tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 48 – nr. 2 – 1983

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, 2260AA Leidschendam. Gironummer 94746
t.n.v. Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

De vereniging stelt zich ten doel het wetenschappelijk onderzoek op het gebied van de elektronica en de informatietransmissie en - verwerking te bevorderen en de verbreiding en toepassing van de verworven kennis te stimuleren.

Lidmaatschap

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat -behoudens ballotage- open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt. De contributie bedraagt fl. 60,--.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt f 60,--. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

DE EXAMENS

De door het Genootschap ingestelde examens worden afgenomen in samenwerking met de "Vereniging tot bevordering van Elektrotechnisch Vakonderwijs in Nederland (V.E.V.)". Het betreft de examens:

a. op lager technisch niveau: "Elektronica monteur N.E.R.G.";
b. op middelbaar technisch niveau: "Middelbaar Elektronica technicus N.E.R.G.".

Voor deelname, inlichtingen omtrent exameneisen, reglement, en uitgewerkte opgaven wende men zich tot het Centraal Bureau van de V.E.V., Barneveldseweg 39, 3862 PB Nijkerk; tel. 03494 - 4844.

UITREIKING VEDERPRIJS 1981 OP 4 NOVEMBER 1982 TE DELFT

Mijnheer de voorzitter van het NERG
Mevrouw van Hoboken-Veder
Dames en Heren

Het Wetenschappelijk Radiofonds Veder heeft ten doel de bevordering van de ontwikkeling van de wetenschap en techniek op het gebied van radio-telegrafie, radio-telefonie en radio-televisie en al zodanige wetenschappen en technieken, welke in de toekomst uit of naast deze bovengenoemde wetenschappen en technieken mochten voortkomen en ontstaan. De Stichting tracht dit doel o.a. te bereiken door jaarlijks één prijs uit te reiken aan die man of vrouw, door geboorte Nederlander, die naar oordeel van het Stichtingsbestuur, door een uitvinding of werkwijze en in het algemeen door werkzaamheid op het eerder genoemde gebied, het meeste heeft bijgedragen tot dit doel.

U moet niet denken dat de statutaire beperking van prijsuitreikingen tot Nederlanders betekent, dat de beloonde werkzaamheden niet van internationale betekenis of zelfs van wereldwijde faam kunnen zijn. In de lange lijst van prijsuitreikingen sinds 1929 treffen wij illustere namen aan, zoals H.Bremmer en H.C.van de Hulst - namen die ook de gastarbeider die vandaag de considerans voor de prijstoekenning 1981 mag uitspreken, bekend waren, vóórdat hij zich in Nederland vestigde.

Laat ons bij het internationale aspekt blijven stilstaan. Het thema van de NERG-vergaderingen vandaag is "Het ongestoord samenleven van elektronische systemen". Voor radiocommunicatiesystemen, die dikwijls grote afstanden moeten overbruggen en derhalve van zeer gevoelige ontvangers en uiterst krachtige zenders gebruik maken, is dat "ongestoord samenleven" geen resultaat van provinciaal of nationaal milieu-beleid. Dat is een internationale zaak geworden. De grootste uitdaging voor vele huidige en toekomstige radiocommunicatie-ingenieurs ligt niet meer in de ruis van de natuur of van elektronische componenten, maar in de beheersing van storingen van medegebruikers van het schaarse frequentiespektrum.

Zoals U weet, is het frequentiespektrum niet een nationaal eigendom. Denkt U bijvoorbeeld aan een grondstation dat berichten via een INTELSAT-satelliet op 40.000 km afstand moet kunnen ontvangen en uitzenden. Stelt U zich verder voor dat zo'n grondstation door onze vriendelijke zuiderburen in de heuvels over de taalgrens ten zuiden van Brussel wordt geplaatst. Dan be-



Van links naar rechts ir. L.P.Ligthart, ir. L.R.Nieuwkerk en prof.dr. J.Arnbak.

staat er risico dat aardse straalverbindingen op dezelfde frequenties rond 6 GHz gestoord worden tot ver over de nationale grenzen.

De formele risicozones worden vastgesteld voor verschillende elevatiehoeken naar de satelliet conform een regeling van de Internationale Telecommunicatie Unie (ITU). Binnen deze zogeheten coördinatiecontouren lopen ontvangers in de PTT-straalverbindingen voor telefonie (en voor de zich toch al zo bedreigde voelende TV-omroep) ernstig gevaar door buitenlandse satellietcommunicatie. Het gevaar schuilt hier uiteraard niet in boze Belgische bedoelingen, maar geheel in kleine en grote troposferische onregelmatigheden - regendruppels, turbulenties en inversies van de brekingsindex - die de elektromagnetische golven, gericht op de satelliet, kunnen verstrooien of leiden naar onbedoelde ontvangers in Nederland, Duitsland, Luxemburg, Frankrijk of Engeland.

U zult begrijpen dat het totstand brengen van nauwkeurige troposfeermodellen thans een zaak van grote internationale betekenis is. Twee weken geleden sprak ik in Parijs de ontwerper van de huidige mode in coördinatie-contouren, Professor Crane.Hij gaf toe dat deze berekeningsmethodiek - zoals thans opgenomen in Appendix 29 van het Internationale Radio Reglement - zeer snel tot stand was gekomen, na middernacht op een vergadering in Genève, mede onder druk van de juristen en diplomaten. Professor Crane kon echter niet zeggen of deze contouren hierdoor te optimistisch of te pessimistisch zijn. U

weet het - de optimist meent dat wij leven in de beste van alle werelden. De pessimist vreest dat dit zo is.

Maar de wetenschapper toetst, mits professioneel bezig, zijn wereldbeeld niet op zijn optimisme of pessimisme, maar op geschikte experimenten. Het experimenteel verkrijgen van een juist beeld van de grilligheden en uitschieters van de troposfeer is echter geen sinecure. Door samenwerking tussen medewerkers van de twee vakgroepen "Microgolftechniek" en "Transmissie van Informatie" van de TH Delft is, op het dak van het hooggebouw van de afdeling der elektrotechniek, een bijzondere radar voor troposfeeronderzoek tot stand gekomen. Hij is op grote afstand zichtbaar voor iedereen die zich met openbaar vervoer of eigen auto tussen Den Haag en Rotterdam beweegt. Door de richting van de grote antenne gade te slaan is zodoende op grote afstand aanwezigheidsregistratie van de betreffende vakgroepsmedewerkers mogelijk, iets dat volstrekt past in het huidige bestuurlijke streven bij de wetenschappelijke instellingen in Nederland.

Deze 10-cm radar werkt niet op basis van het gebruikelijke puls-principe, maar juist met continue frekwentiegemoduleerde signalen. Dit stelt bijzondere eisen aan de lineariteit van de signalen. Verder beschikt de installatie zoals gezegd over een bijzonder antennesysteem met bijbehorende computerbesturing. Ook de signaalbehandeling is sterk gedigitaliseerd en geautomatiseerd.

De Delftse radar is uitvoerig beschreven door de ontwerpers in een publikatie in "Proceedings of the I.E.E." van december 1980, en dit achtenswaardige Britse Ingenieursinstituut heeft onlangs de beide auteurs de "BLUMLEIN-BROWNE-WILLIAMS Premium" toegekend

"For the Science and the art of TV or pulse and wideband techniques".

Ir. Nieuwkerk en ir. Ligthart. Het bestuur van het Vederfonds was het Britse Instituut vóór met de erkenning dat de door U ontworpen en beschreven radar een uitzonderlijke bijdrage tot de nationale én internationale radiowetenschappen en radiotechniek is. Daarom heeft het bestuur besloten om U de Vederprijs 1981 te laten delen. Door omstandigheden is de uitreiking pas nú, laat in 1982; echter dat past heel goed in het kader van het thema van juist deze werkvergadering.

Dames en Heren,

De Vederprijs 1981 werd aldus toegekend aan ir. L.P. Ligthart en ir. L.R. Nieuwkerk op grond van

Hun analyse en ontwerp, volgens het Richter-principe, van een FM-radar waarmee groot oplossingsvermogen en ruime mogelijkheden voor troposfeeronderzoek zijn gerealiseerd door de combinatie van moderne antennetechniek met digitale besturing en signaalbewerking.

Als persoonlijke noot voeg ik daarbij mijn bewondering voor het doorzetvermogen en de samenwerking van uw beide vakgroepen waardoor een, zeker naar de huidige finaciële maatstaven van de wetenschappelijke instellingen, zeer grote faciliteit tot stand is gebracht.
Ir. Ligthart, ir. Nieuwkerk. Het is mij een genoegen U nu uit te nodigen om de Vederprijs 1981 en de bijbehorende oorkonden in ontvangst te nemen.

J.Arnbak



Na afloop in het E-café.

DE TROPOSFEERRADAR VAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

Ir. L.P. Ligthart en Ir. L.R. Nieuwkerk
Technische Hogeschool Delft

A high-resolution S-band FM-CW radar system for remote sensing of the troposphere has been built at Delft University of Technology to extend knowledge about phenomena occuring in the troposphere and related to radiocommunication. The design of the radar and signal processing is described. Some results are given to illustrate the potentials of the radar.

1. INLEIDING

Geachte Prof. Arnbak, Mevr. van Hoboken, geachte leden van het bestuur van de Stichting Wetenschappelijk Radiofonds Veder, meneer de voorzitter, dames en heren.
Graag willen wij van de ons geboden gelegenheid gebruik maken om onze dank uit te spreken voor deze onderscheiding, die ons ten deel gevallen is en waarmee wij erg irgenomen zijn. Wij geven gaarne gehoor aan het verzoek u iets over ons werk, waarvoor de prijs toegekend is, te vertellen.

Dit werk vond plaats in het kader van het zogenaamde dakprojekt, het samenwerkingsprojekt tussen de vakgroepen Microgolftechniek en Transmissie van Informatie van de Afdeling der Elektrotechniek en beoogt het verrichten van experimenten en onderzoekingen met de op het dak van het gebouw van de Afdeling der Elektrotechniek geplaatste universele hoge resolutie antenne. Na gebruik van de antenne voor een aantal satellietontvangst experimenten is de antenne nu onderdeel van een troposfeerradar, bekend onder de naam DARR (Delft Atmospheric Research Radar).

Bij satellietcommunicatie vormt de troposfeer een deel en bij straalverbindingen geheel de radioweg. De invloed van de troposfeer op de radioweg is erg groot. Zo veroorzaakt regen, sneeuw en ijs in de troposfeer verzwakking van het signaal (de zgn. absorptie- en scintillatie fading) en polarisatiedraaiing van de uitgezonden en te ontvangen radiogolven. Bij helder en windstil weer kunnen lagen structuren met verschillende brekingsindices ontstaan waardoor radiogolven kunnen reflecteren. In een dergelijke situatie kan er sprake zijn van meerweg ontvangst waarbij langdurige verzwakking of uitdoving van te ontvangen signalen kan ontstaan (de zgn. meerweg-fading). De genoemde effecten gelden des te meer voor de nieuw te ontsluiten hogere frequentiebanden (> 15 GHz). Teneinde onderzoek te doen aan fenomenen die zich afspelen in de troposfeer en aan invloed hiervan op het transmissiegedrag van radiogolven in de troposfeer, is de troposfeerradar ontwikkeld. Het doel is te komen tot het opstellen van betrouwbare propagatiemodellen die gebruikt kunnen worden bij planning van nieuwe, in de hogere frequentiebanden werkende, telecommunicatiesystemen.
De gevoeligheid en resolutie van de radar dient groot te zijn, terwijl zowel snelle als langzame veranderingen waargenomen dienen te worden. In onderstaande Tabel I is het soort te detecteren verschijnsel, alsmede het gedrag van de "reflectivity" en de benodigde resolutie weergegeven.

verschijnsel	gedrag	reflectivity in cm^{-1}	resolutie in m
regen	snel	10^{-9}	15
wolken	stabiel	10^{-11}	15
thermische cellen	snel	10^{-13}	3
inversielagen	langzaam	10^{-15}	3

Tabel I

Behalve de door het weer veroorzaakte verschijnselen zijn ook met behulp van de radar andere fenomenen waar te nemen, zoals die veroorzaakt door luchtvervuiling en de vortex van vliegtuigen.

In het navolgende wordt de opbouw van DARR beschreven gevolgd door enige karakteristieke resultaten van metingen verricht met DARR. De belangstellende lezer wordt voor aanvullende informatie verwezen naar de in de open literatuur verschenen artikelen (1, 2, 3, 4 en 5).

2. OPBOUW DARR

2.1 Antenne

Op het dak van het gebouw van de Afdeling der Elektrotechniek, 90 m. hoog, bevindt zich een laboratoriumruimte 8m x 12m waarop de antenne gemonteerd is. Fig. 1 laat u een foto van de antenne-installatie zien. Het ontwerp van de antenne werd, naar ideeën van de Technische Hogeschool, gedaan door BTA Engineering, terwijl de constructie en installatie uitgevoerd werd door VMF-Stork. De

antenne heeft een zogenaamde geïnclineerde opstelling met de azimuth as verticaal en waarbij de geïnclineerde as een hoek maakt van 42,5° met de verticaal. Met deze opstelling is een elevatiehoek voor elke azimuth hoek mogelijk van 5° onder de horizon tot in het zenith.



Fig. 1 DARR antenneopstelling

De ingewikkelder besturing, ten opzichte van een opstelling met twee loodrechte assen, wordt verricht met behulp van een minicomputer. De geïnclineerde opstelling heeft, mede door het toepassen van holle lagers met grote diameter (Ø 1.80 m) de volgende voordelen:

- voldoende ruimte in het bovenste deel van de montering voor de opstelling van gevoelige microgolfapparatuur zonder de noodzaak gebruik te moeten maken van roterende koppelingen.
- goede toegankelijkheid tot het midden van de grote reflector.
- de mogelijkheid om te zamen met de grote paraboolantenne ook andere paraboolantennes te bevestigen.
- een minimum aan werkzaamheden op het dak van de hoogbouw in verband met veiligheid.

De instelnauwkeurigheid is 0.02° en de draaisnelheden resulteren in een draaisnelheid van 0.01 tot 20°/min voor een elevatie- en 0.01 tot 36°/min voor een azimuth beweging. Voorzieningen zijn getroffen om de, tengevolge van het bewegen van de antenne, optredende polarisatievlakdraaiing van de uit te zenden, dan wel te ontvangen gepolariseerde golven, indien gewenst, te compenseren.

De grote paraboolantenne heeft een diameter van 4.28 m (F/D = 0,25) en heeft een zodanige waarde van de oppervlaktetolerantie dat de reflector geschikt is voor het gebruik bij frequenties tot 40 GHz. De eveneens bij DARR in gebruik zijnde kleine antenne heeft een antenne van 2.12 m (F/D = 0,33).

2.2 Zend- en ontvangapparatuur

De radar werkt volgens het bekende FM-CW (Frequency Modulated-Continuous Wave) principe (6). In Fig. 2 is dit principe weergegeven. Op afstand R van de radar bevindt zich een reflectie. Een lineair met de tijd in frequentie toenemend signaal wordt continu gedurende tijd T_m uitgezonden. Het ontvangen signaal is met $\Delta t = 2R/c$ vertraagd. Het bepalen van de verschilfrequentie f_b van het uitgezonden en ontvangen signaal levert de afstand R en de amplitude van deze verschilfrequentie is een maat voor de sterkte van de reflectie. Deze grootheden kunnen verkregen worden door het frequentiespectrum van het verschilsignaal te bepalen. In het geval van meervoudige reflecties is de afstandsresolutie h van belang, deze grootheid is alleen afhankelijk van de grootte van de gebruikte frequentiezwaai F.

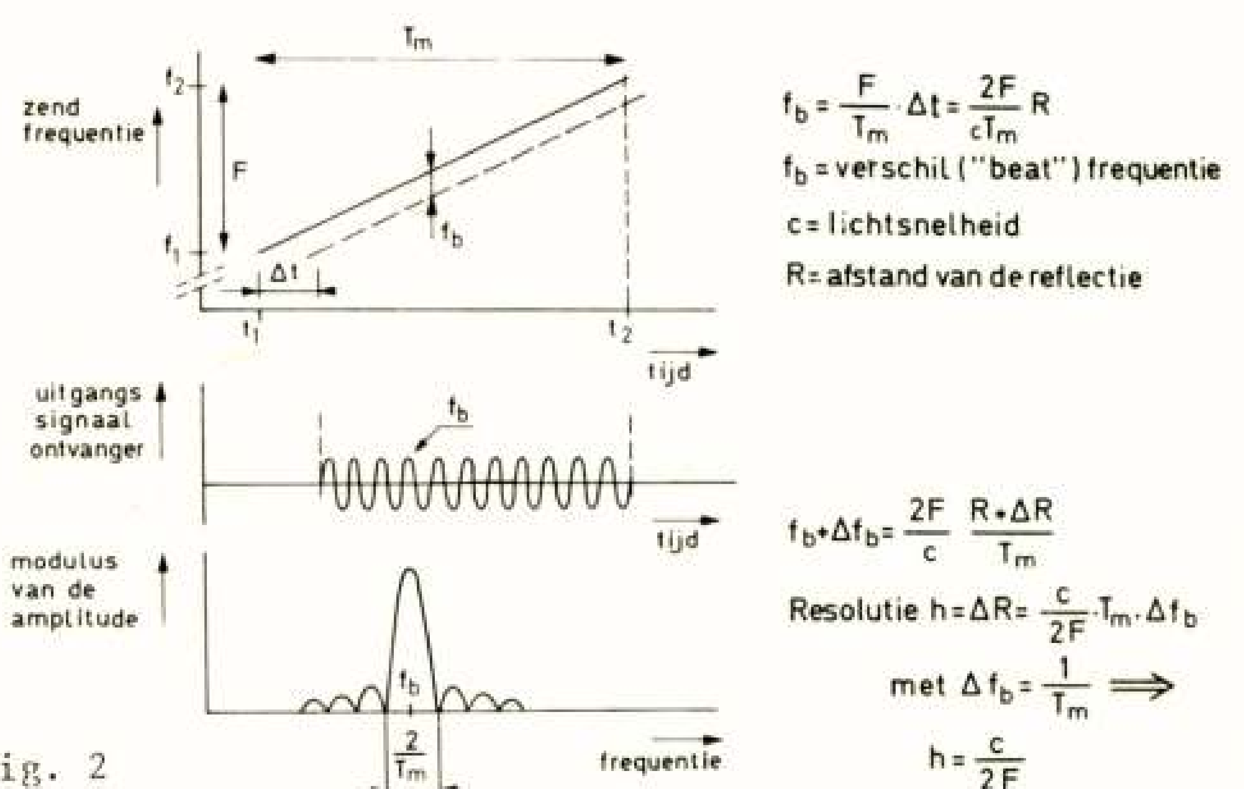


Fig. 2

Principe van de FM-CW radar.
De verschilfrequentie wordt verkregen door menging van het ontvangen en uitgezonden signaal

De voordelen van het gebruik van het FM-CW principe zijn:

- grote gevoeligheid, aangezien de ontvanger een "matched filter" is.
- smalbandigheid van het verschilfrequentiesignaal, waardoor een eenvoudige digitalisering en inlezing in een minicomputer mogelijk is.
- coherentie in het verschilfrequentiesignaal, waardoor via signaalbewerkingen in de minicomputer voordeel behaald wordt.

Als nadeel van het gebruikte principe dient de grote benodigde ontkoppeling tussen zend- en ontvangweg, vanwege het gelijktijdig zenden en ontvangen en de daardoor mogelijke oversturing van de ingangstrap van de ontvanger, genoemd te worden.

Om voldoende ontkoppeling te verkrijgen is gekozen voor:

- gescheiden antennes voor zend- en ontvangweg. De grote parabool wordt gebruikt voor zenden en de kleinere parabool voor ontvangst.
- toepassing van een speciale voor de radar ontworpen primaire belichter en het aanbrengen van een "rim" rond de grote paraboolantenne (6).

Deze maatregelen waren ook nodig om een verhoging van de verre zijlussen en indirect daarmee verlaging van de grond-"clutter" te verkrijgen.

In Fig. 3 is het blokschema van de ontvanger en zender

weergegeven, terwijl in Tabel II de parameters van DARR vermeld zijn.

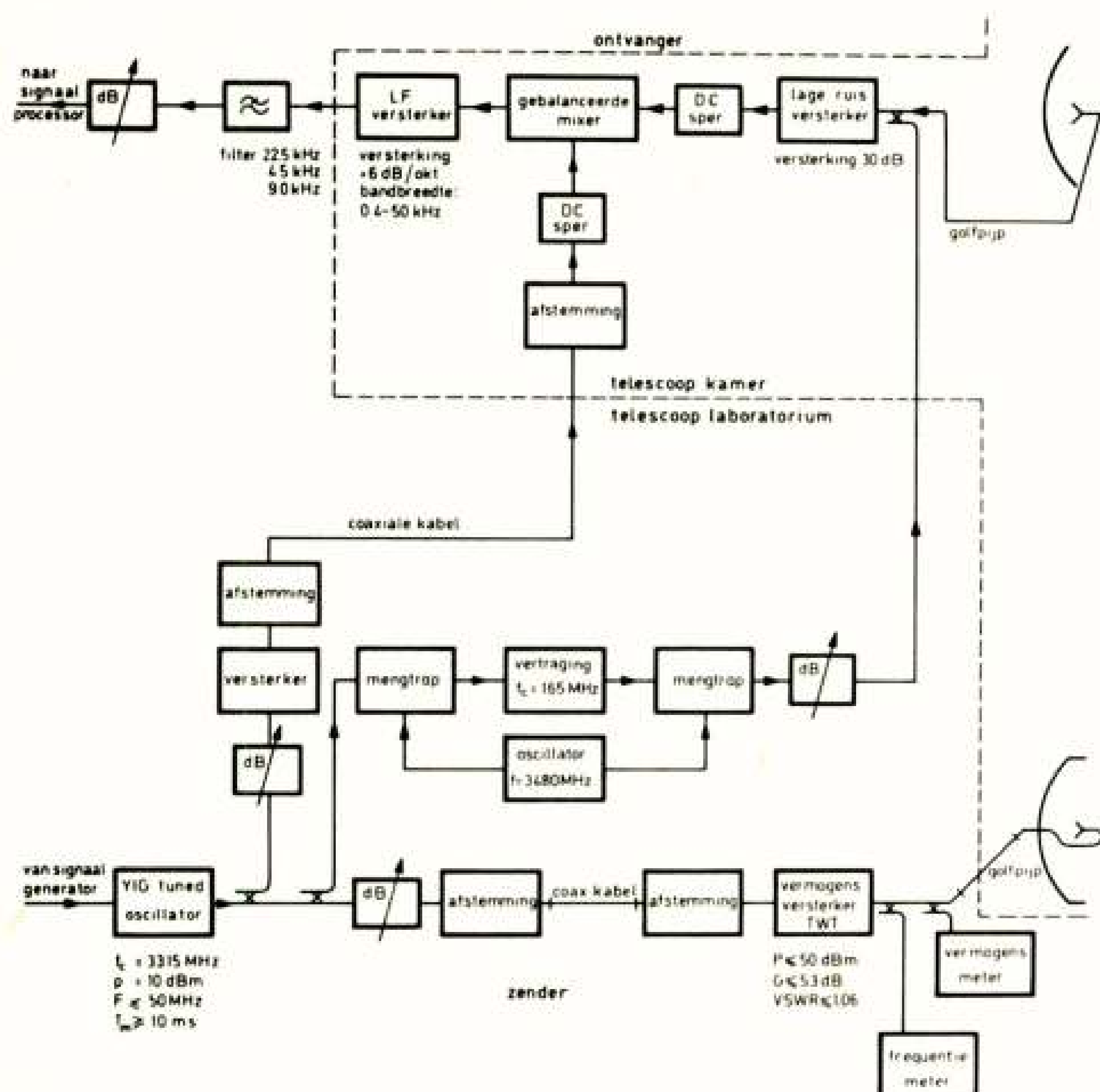


Fig. 3 **Blokschema van de ontvanger en zender van de radar**

Type radar	lineaire FM-CW
Zendvermogen	< 100 W
Centrale frequentie f_c	3315 MHz
Frequentiezwaai F	1-50 MHz
Zwaaitijd T_m	0.01-1 s
Analysator bandbreedte B	1-100 Hz
Verschil frequentie f_b	0.4-100 kHz
Afstandsresolutie h	150/F m
Afstandsbereik R	0.05-15 km
Max. Doppler snelheid	$\pm$ 0.075.$2^n/f_c 2T_m$) (n = 0, 1, 2, 3)
Isolatie tussen de antennes	> 90 dB
Ruisfaktor	5.5 dB
Antennebundelingsfaktor	32.7 dB (ontvanger), 40 dB (zender)
Min. te detecteren "reflectivity"	$6.3 \cdot 10^{-16} R^2 B/hT_m cm^{-1}$

<u>Tabel II</u> DARR systeem parameters

2.3 Signaalbewerking

Zoals reeds in §2.2 vermeld is dient het frequentiespectrum van het verschilfrequentiesignaal bepaald te worden. Dit verschilfrequentiesignaal wordt verkregen door menging en filtering van het uitgezonden en ontvangen signaal. Teneinde optimale resultaten te verkrijgen is het gewenst te beschikken over verschillende methoden van filtering voor en na het bepalen van het spectrum. Om te voorkomen dat een grote hoeveelheid data, waarvan wellicht veel niet significant is, opgeslagen dient te worden, is gekozen voor een oplossing waarin zoveel mogelijk de signaalbewerking en visualisering in "quasi real time" plaats vindt. Dit stelt de radarwaarnemer in staat de opslag van informatie uitsluitend te beperken tot de significante data. Deze opgeslagen data kan dan "off line" bewerkt worden.

Om dit doel en de genoemde flexibiliteit in het toepassen van verschillende signaalbewerkingsalgorithmen te bereiken is gekozen voor het gebruik van een microprogrammeerbare rekenmachine. (HP 21MX)
Deze rekenmachine en de antennebesturingsrekenmachine zijn beide verbonden met een centrale rekenfaciliteit bedoeld voor programma-ontwikkeling en voorzien van noodzakelijke randapparatuur.
In Fig. 4 is een blokschema van van de signaalbewerkingsapparatuur gegeven.

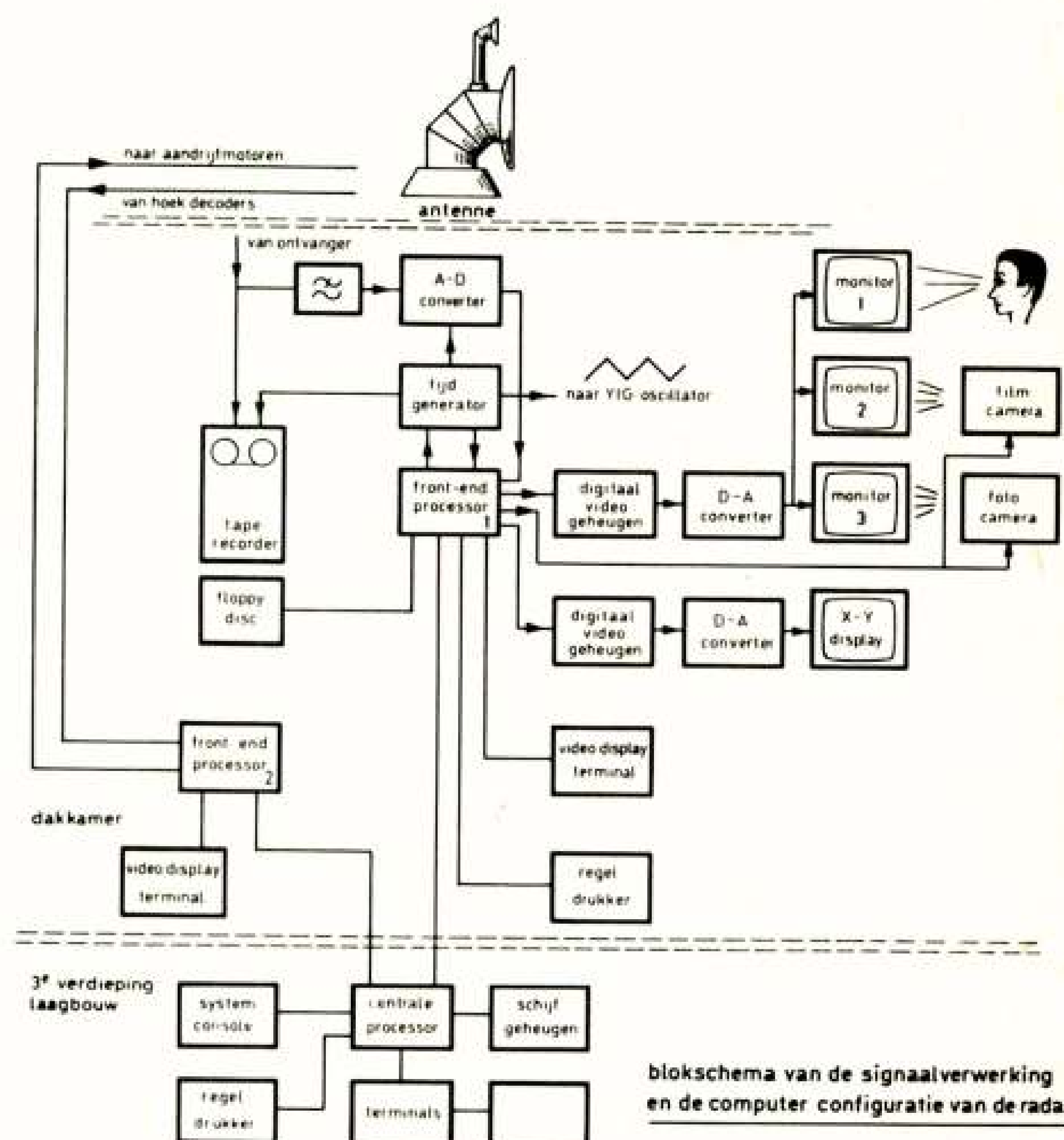


Fig. 4

Het signaal afkomstig uit de ontvanger wordt door de 12 bit analoog-digitaal omzetter gedigitaliseerd en in de rekenmachine ingelezen. De tijdgenerator levert de bemonsterpulsen voor de analoog digitaal omzetter, de commandopulsen voor de rekenmachine en het driehoekvormige signaal voor de FM-modulator. Aan de lineariteit en de ruiseigenschappen van de modulator worden hoge eisen gesteld.

Na signaalbewerking door de rekenmachine worden de resultaten ingelezen in twee typen digitale geheugens en na digitaal-analoog conversie weergegeven op monitors. Eén geheugen bestaat uit 8 x 512 cellen en wordt gebruikt om het berekende en gefilterde spectrum weer te geven op een A-scoop (512 lijnen met 256 niveaus), het andere geheugen bestaat uit 5 x 512 x 512 cellen en levert via een digitaal-analoog omzetter een beeld met 32 helderheids-

niveaus en opgebouwd uit 512 berekende en gefilterde spectra van ieder 512 punten. Het beeld schuift een lijn naar boven als een nieuw berekend spectrum toegevoegd wordt. Een foto/filmcamera bestuurd door de rekenmachine kan automatisch registraties verrichten, terwijl een analoge "instrumentatie recorder" voor data-opslag ter beschikking is.

De signaalbewerkingsprogramma's zijn zoveel mogelijk microgeprogrammeerd en in ROM's geïmplementeerd. Tot onze beschikking staan de volgende programma's:

- Fouriertransformaties tot 8k punten
- Vensters om de zijlussen te onderdrukken, die onstaan door het toepassen van een discrete fouriertransformatie op niet-periodieke signalen
- ruimtelijke en tijdmiddeling (pre-filter) om de gevoeligheid van de radar te vergroten
- digitale filterbewerkingen op het fouriergetransformeerde signaal (post-filter) om ruis in het spectrum te onderdrukken.
- berekening van het vermogensspectrum en de logaritme hiervan
- bepaling van de Doppler snelheidsspectra
- grond "clutter" onderdrukkingsmethoden
- ruisonderdrukkingsmethoden
- relatieve- en absolute ijking van de radar. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een ijklijn en een op een afstand van ca. 1.5 km achter ramen van een gebouw opgestelde roterende vlakke plaat reflector.

3. ENIGE MEETRESULTATEN VERKREGEN MET DARR

DARR geeft ons de mogelijkheid intensiteiten en plaatsen/of tijdsafhankelijkheid van atmosferische verschijnselen te bestuderen.

De karakteristieke grootheid die aan atmosferische lagen tijdens stabiel helder weer gemeten kan worden is de verandering van de brekinsindex als functie van hoogte en tijd. Een troposfeerlagenmodel is ontwikkeld gebaseerd op atmosferische turbulentie en stelt ons in staat om langs het radarpad uit het verloop van reflectiecoëfficiënt en snelheidsverdeling de veranderingen van de brekingsindex te bepalen.

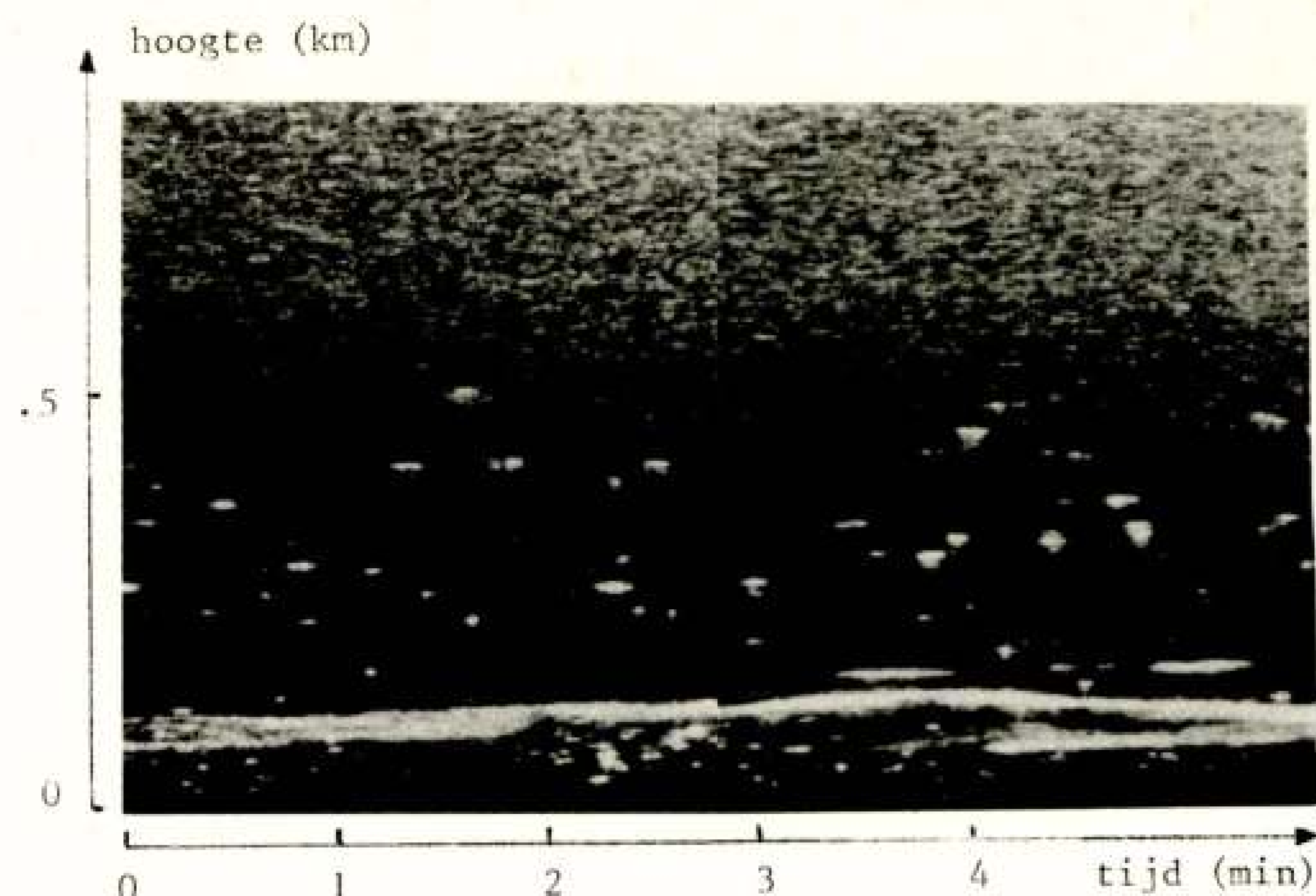


Fig. 5 Troposfeerlagen

In fig. 5 is het resultaat van een meting weergegeven, gedaan met stilstaande en naar het zenith gerichte DARR antennes en waarin getoond wordt dat deze lagen in de atmosfeer niet continu aanwezig hoeven te zijn, maar met korte tijdintervallen aan de radar voorbijtrekken. Verticaal is de hoogte uitgezet en horizontaal de tijdas. De intensiteit is een maat voor de grootte van de reflectie De laag op een hoogte van 50 m vertoont de genoemde onde brekingen. Tevens toont de foto meerdere dunne lagen waarmee het belang om met hoge afstand resolutie radarmetingen te verrichten wordt ondersteund. Uit metingen van Dopplerfrequenties en fase van de reflectie zijn we in staat de correlatie van de reflectie in tijd en plaats te bepalen. Grote verschillen in de correlatie worden gemeten afhankelijk van de meteorologische omstandigheden.

Een voorbeeld waarbij correlatie-studies essentieel zijn om tot een goede karakterisering van de lagen te komen is gegeven in figuur 6, waarin een sterke turbulentie met een opstijgende inversielaag wordt getoond. In het tijdinterval van 90 minuten stijgt de inversie van 150 m op tot 330 m hoogte boven het gebouw, terwijl het dynamische gedrag van de turbulentie onder de inversie een grillige tijdafhankelijkheid vertoont.

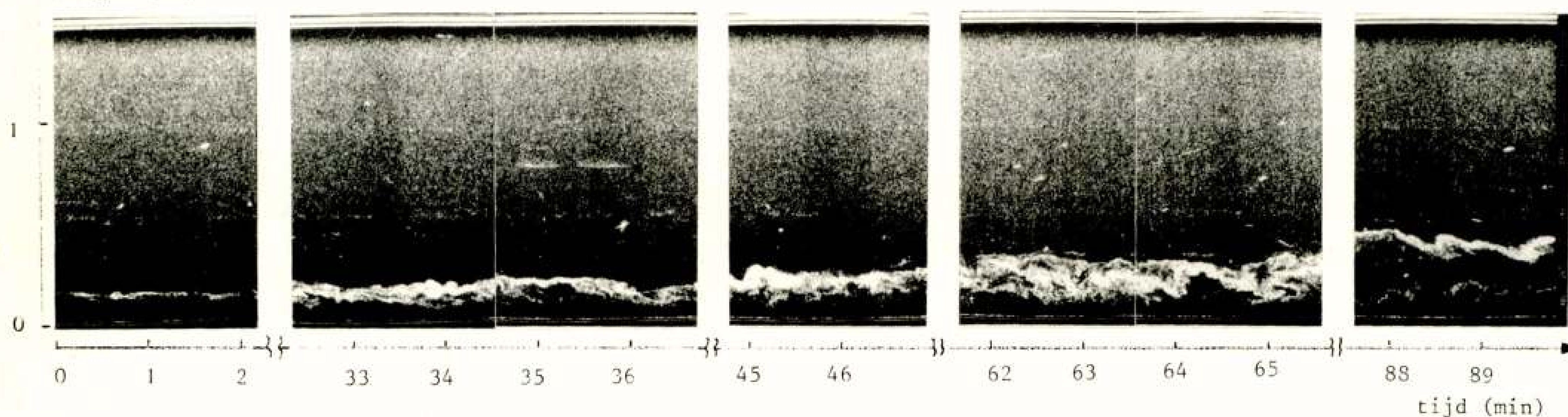


Fig. 6 Turbulenties

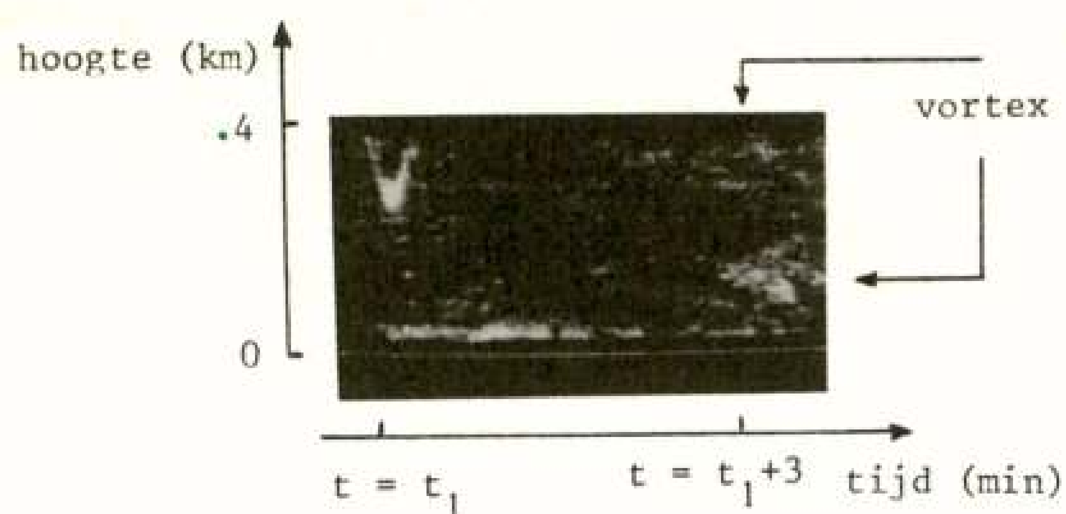


Fig. 7 Wake-vortex van een F-28 straalverkeersvliegtuig

De mogelijkheden om m.b.v. DARR turbulentie te meten stelde ons in staat een "wake-vortex" experiment op te zetten. Samen met Rijksluchtvaartdienst, Fokker en NLR hebben wij radarmetingen verricht aan turbulentie, gemaakt door vleugeltips van een vliegtuig tijdens het laag overvliegen van het F-28 laboratoriumvliegtuig A 1 van Fokker. Figuur 7 geeft de afstand-tijd informatie van de reflectie bij verticaal gerichte DARR antennes en een maximum afstandbereik van 375 m. Op tijdstip $t = t_1$ komt het vliegtuig op een minimale afstand van ca. 250 m boven de radar. Het vliegpad is zo gekozen dat het toestel niet door de hoofdbundel van de radar komt en de wake-vortex drijft langzaam met de wind af in de richting van de hoofdbundel. In het getoonde voorbeeld zien wij dat zelfs na 3 minuten de vortex nog duidelijk zichtbaar op het radarscherm verschijnt en een neerwaartse beweging heeft ondergaan. Het in "real time" zichtbaar maken van deze turbulenties maakt deze radar tot een uniek meetinstrument.

Gehoopt mag worden dat meerdere van deze vliegtuigexperimenten zullen volgen. Deze vervolgexperimenten, waarin ook Doppler snelheidsspectra van wake-vortex worden gemeten, dienen om aanvullende informatie te verschaffen.

Ten behoeve van de radiocommunicatie neemt nationaal en internationaal de interesse toe om m.b.v. radarsystemen zoals DARR de hydrometeoren in kwantitatieve zin te onderzoeken. Studies met DARR hebben aangetoond dat uit kwantitatieve meting van de tijd- en plaatsafhankelijke Doppler spectra over een groot dynamisch bereik de bepaling mogelijk is van

- de regendruppelverdeling onder de zgn. 0°C-isotherm en voor verschillende typen regenbuien
- de aanwezigheid van smeltende ijsdeeltjes onder de 0°C-isotherm
- de mixture van ijsdeeltjes, regen en sneeuw rondom de 0°C-isotherm
- hydrometeoren boven de 0°C-isotherm
- de verticale luchtsnelheid in regenbuien
- de convergentie en/of divergentie van de horizontale wind in regenbuien
- de regenintensiteit met een belangrijke spin-off van de metingen van neerslag t.b.v. hydrologie.

In Figuur 8 is een voorbeeld van regenmetingen met DARR gegeven tijdens een hevige regenbui. De antennes zijn ook hier naar het zenith gericht. Het maximale hoogtebereik is 7,5 km en het gevisualiseerde dynamische bereik is 40 dB. Uit deze 10 minuten durende registratie wordt duidelijk dat door snelle veranderingen in reflectie als functie van tijd en plaats de benodigde vast te leggen radar meetgegevens in korte tijd zeer groot is. Wil de verkregen informatie bruikbaar zijn t.b.v. onderzoek naar het voortplantingsgedrag van radiogolven, dan dient datareductie verkregen te worden, b.v. door het opstellen van vereenvoudigde modellen. Deze propagatiemodellen zijn van belang om in quasi-real time plaats- en/of tijdsafhankelijkheid van specifieke fenomenen langs het radarpad nauwkeurig vast te leggen.

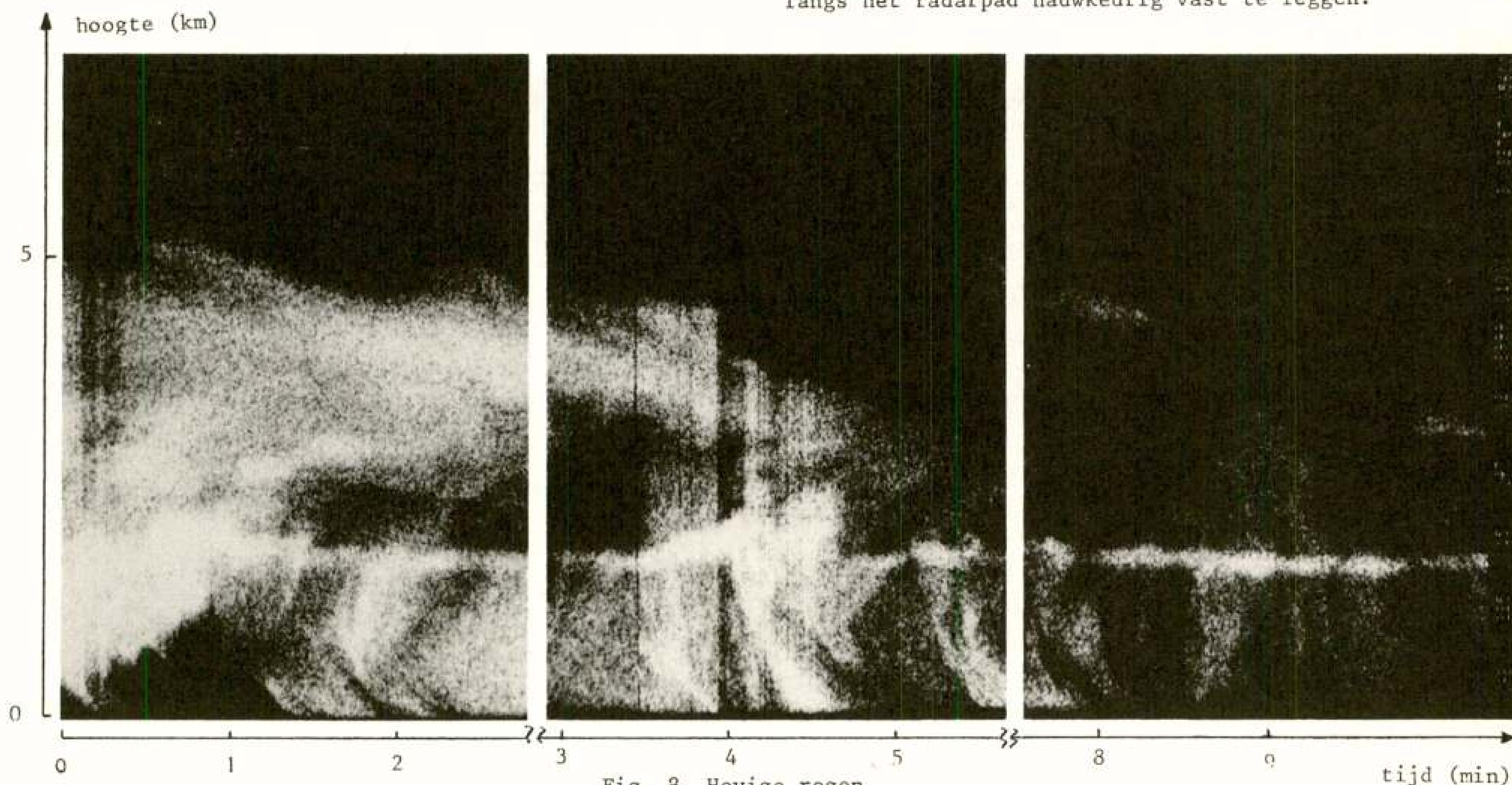


Fig. 8 Hevige regen

Ons toekomstig onderzoek zal hierop gericht zijn, gecombineerd met onderzoek naar verbetering van de radartechnologie, zowel op het gebied van de microgolftechniek als op het gebied van radar signaalbewerking.

Tot slot willen wij iedereen die bij dit project betrokken is geweest, bedanken voor hun bijdrage. Hierbij denken we aan de beide voorzitters van de bij dit project betrokken vakgroepen, Prof.dr.ir. J.L. Bordewijk en Prof.ir. L. Krul, die zich ingezet hebben voor de plaatsing van de antenne, voor de geboden gelegenheid onderzoek te doen op dit gebied en voor de vele discussies tijdens de voortgang van het project.
Van de technici die bij de opbouw van het systeem een grote inzet geleverd hebben, noemen we met name J. Zijderveld die tot op heden bij het project betrokken is.
Tot slot noemen wij de vele bij dit project betrokken studenten tijdens hun taak- en afstudeerwerk.

REFERENTIES

1. Ligthart, L.P. en Nieuwkerk, L.R., "FM-CW Delft Atmospheric Research Radar"; IEE Proc.-F. 127 (1980), no. 6, pp 421-426.
2. Ligthart, L.P., "System Considerations of the FM-CW Delft Atmospheric Research Radar (DARR)"; Proc. IEEE International Radar Conference, Arlington, 28-30 April 1980, Washington 1980, pp 38-43.
3. Ligthart, L.P. en Nieuwkerk, L.R., "Review of capabilities of the Delft FM-CW radar for measurements of precipitation"; Proc. URSI-IEE Open Symposium on Multiple-Parameter Radar Measurements of Precipitation, Bournemonth 1982, pp 102-109.
4. Ligthart, L.P., "Measurements with the Delft FM-CW radar during rain events"; Proc. URSI-IEE Open Symposium on Multiple Parameter Radar Measurements of Precipitation, Bournemonth 1982, pp 153-159.
5. Ligthart, L.P. en Nieuwkerk, L.R., "Capabilities of the Delft FM-CW radar for measurements of precipitation"; wordt gepubliceerd in Radio Science in 1983.
6. Richter, J.H., "High resolution tropospheric radar sounding", Radio Science, 1969, 4, pp 1261-1268.

Voordracht gehouden ter gelegenheid van de uitreiking van de Vederprijs op 4 november 1982 in de afdeling der Elektrotechniek THD tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 310), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie.

NELSIS OF HET SAMEN OPZETTEN VAN CAD HULPMIDDELEN VOOR VLSI

P. Dewilde
Technische Hogeschool Delft

A Co-operative System for Large Scale Integrated Circuit Design. Het NELSIS programma is een samenwerkingsverband tussen onderzoekers en industrie. Het beoogt het slagvaardig aanpakken van het ontwerp (design) probleem voor grote geïntegreerde circuits (VLSI) ten behoeve van het Nederlandse bedrijfsleven en de opleidingen aan TH's en HTS'en. De hoofdlijnen van het programma worden in dit artikel uiteengezet. Motivering voor de coöperatieve aanpak en beschrijving van de huidige toestand komen ook ter sprake.

1. INLEIDING

De kontaktgroep 'CACSD' (Computer Aided Circuit and System Design) is vier jaar geleden opgericht om te dienen als een informeel forum voor uitwisseling van ideeën en het coördineren van aktiviteiten op het gebied van computer gestuurd ontwerpen van geïntegreerde circuits. De leden van de werkgroep waren hoofdzakelijk wetenschappelijk medewerkers aan de drie TH's en leden van het Philips Natuurkundig Laboratorium. De kontaktgroep kwam eens in de zes maanden bij elkaar. Tijdens deze bijeenkomsten werden wetenschappelijke voordrachten gehouden en gegevens uitgewisseld over programma's. Op deze wijze ontstond een goed begrip van elkaars aktiviteiten. Tevens zorgde de openheid in de kontakgroep voor opbouwende kritiek en een informele afstemming van elkaars belangstellingen. Toen in het najaar van 1981 een informeel kontakt ontstond tussen de groep en Dr. P.A.J. Tindemans van het direktoraat generaal van Wetenschapsbeleid, kwam al snel het probleem aan de orde dat in het Nederlands bedrijfsleven (buiten Philips), er nauwelijks expertise te vinden is op het gebied van het maken van eigen ontwerpen voor geïntegreerde circuits. In een moderne geïndustrialiseerde maatschappij met hoge lonen, is het succes van een eigen produkt dikwijls te danken aan het gebruik van hoogwaardige technologie - "slimmer zijn dan de buurman". Een eigen, "custom" I.C. kan het verschil maken tussen een gewoon en een slimmer produkt. Een duidelijk voorbeeld hiervan is de horloge-industrie. Vandaar de noodzaak voor het Nederlands bedrijfsleven om voldoende kennis en expertise te ontwikkelen zodat ze kan beschikken over deskundigen en know how in dit vakgebied.

In samenwerking met het direktoraat generaal van Wetenschapsbeleid werd een eerste versie van het NELSIS plan opgesteld. Het specifieke doel hiervan was de krachten aan de hogescholen te bundelen om een systeem te ontwikkelen van voldoende omvang, zodat het globale (vrij complexe) ontwerpprobleem in al zijn facetten coherent zou worden aangepakt. In 1982 heeft de kontaktgroep CACSD besloten om nauw te gaan samenwerken met de FOM Werkgemeenschap Halfgeleiders. Door ontwerpers en materiaaldeskundigen in één werkgemeenschap te verenigen, is een overkoepelende organisatie ontstaan van alle onderzoekers, werkzaam op het gebied van de IC-techniek. Na bestudering door de leden van de Werkgemeenschap werd het NELSIS plan, in een iets gewijzigde vorm, goedgekeurd en overgenomen. Het dagelijks bestuur van de kontaktgroep CACSD werd een projektgroep binnen de werkgemeenschap. Daarna werd het NELSIS plan officieel aangeboden aan het Direktoraat Generaal van Wetenschapsbeleid. Op dit ogenblik bestudeerd de overheid, in samenwerking met een raadgevend bureau voor bedrijfsbeheer, de implementatie-aspekten van het plan.

Doelstellingen

Doel van het NELSIS projekt is, het realizeren van een pool van experts op het gebied van IC-design in Nederland, de opbouw van een infrastruktuur om deze designers op te leiden en het ontwikkelen van een systeem voor transfer van expertise van de onderwijsinstellingen (voornamelijk de TH's) naar het bedrijfsleven. Een behoorlijke opleiding tot VLSI-ontwerpers en CACD-deskundigen vereist de aanwezigheid van een compleet systeem voor computer-gestuurd ontwerp. Gezien de omvang van een dergelijk systeem en de voortdurende evolutie van de ontwerp-methoden is het niet verstandig een kant en klaar systeem te kopen. De instellingen moeten zelf een systeem opzetten. Daar ook bedrijven die IC's willen ontwerpen over een systeem moeten beschikken, ontstond het idee van *het coöperatief opzetten van een VLSI-design-systeem* waarvan de componenten modulair op verschillende plaatsen kunnen worden ontwikkeld zodat ieder onderdeel meteen overal bruikbaar wordt.
NELSIS stelt voor: *een gemeenschappelijke ontwerp-omgeving* met de volgende eigenschappen:

* het kan de *complexiteit* van de moderne VLSI (very large scale integrated circuits) aan;

* het is *transportabel* en *helder;*
(waarbij helder betekent, dat de funktie en de methode van ieder onderdeel van het systeem voor iedere gebruiker duidelijk zijn, zodat hij het systeem zelf kan beheren).

* het is *flexibel,* m.a.w. kan zich voortdurend aanpassen aan een wisselende omgeving;

* het is *modulair,* opgebouwd uit vele funkties die op diverse lokaties zijn ontwikkeld ;

* het is *additief,* d.w.z. het systeem kan groeien met het toevoegen van nieuwe componenten;

* het is *didaktisch,* een ontwerper leert uit het systeem zelf hoe het moet worden gebruikt en is onafhankelijk van 'guru's'.

Verdere inhoud

Hoofdstuk 2 is gewijd aan een beschrijving van de VLSI problematiek vanuit het standpunt van een ontwerper. Aan ieder besproken element verbinden we een aantal conclusies m.b.t. het opzetten van het systeem. In hoofdstuk 3 vatten we de NELSIS problematiek nog eens bondig samen. In hoofdstuk 4 gaan we dieper in op de door NELSIS voorgestelde oplossing. In hoofdstuk 5 bespreken we een prototype voor NELSIS zoals dat ontwikkeld is aan de TH te Delft. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 een aantal conclusies getrokken.

2. UITGANGSPUNTEN: DE WERELD VAN DE VLSI DESIGNER

Het NELSIS plan staat beschreven in een publikatie van de FOM-Werkgemeenschap Halfgeleiders [1]. In dit rapport wordt uitgegaan van de volgende analyse van de toestand van het vakgebied.

a. *Het idee van de Silicon-Foundry*

Naar aanleiding van het boek van Mead and Conway [2] is het inzicht gegroeid, dat een duidelijke scheiding kan worden gedefinieerd tussen het werk van de IC-ontwerper en de activiteiten van de IC-producent. Het ontwerpen van een IC wordt in de toekomst als de professionele fotografie nu is. In fig. 1. wordt het idee schematisch weergegeven.

Een bedrijf kan zelf IC's ontwerpen hierbij geholpen door een ontwerpsysteem. Het hart van het systeem is het "ontwerpstation" - vergelijkbaar met een professionele camera. Het produceert een "patroon-generatortape" (PG-tape), het equivalent van een belichte film. De PG-tape gaat naar een chip-producent, een

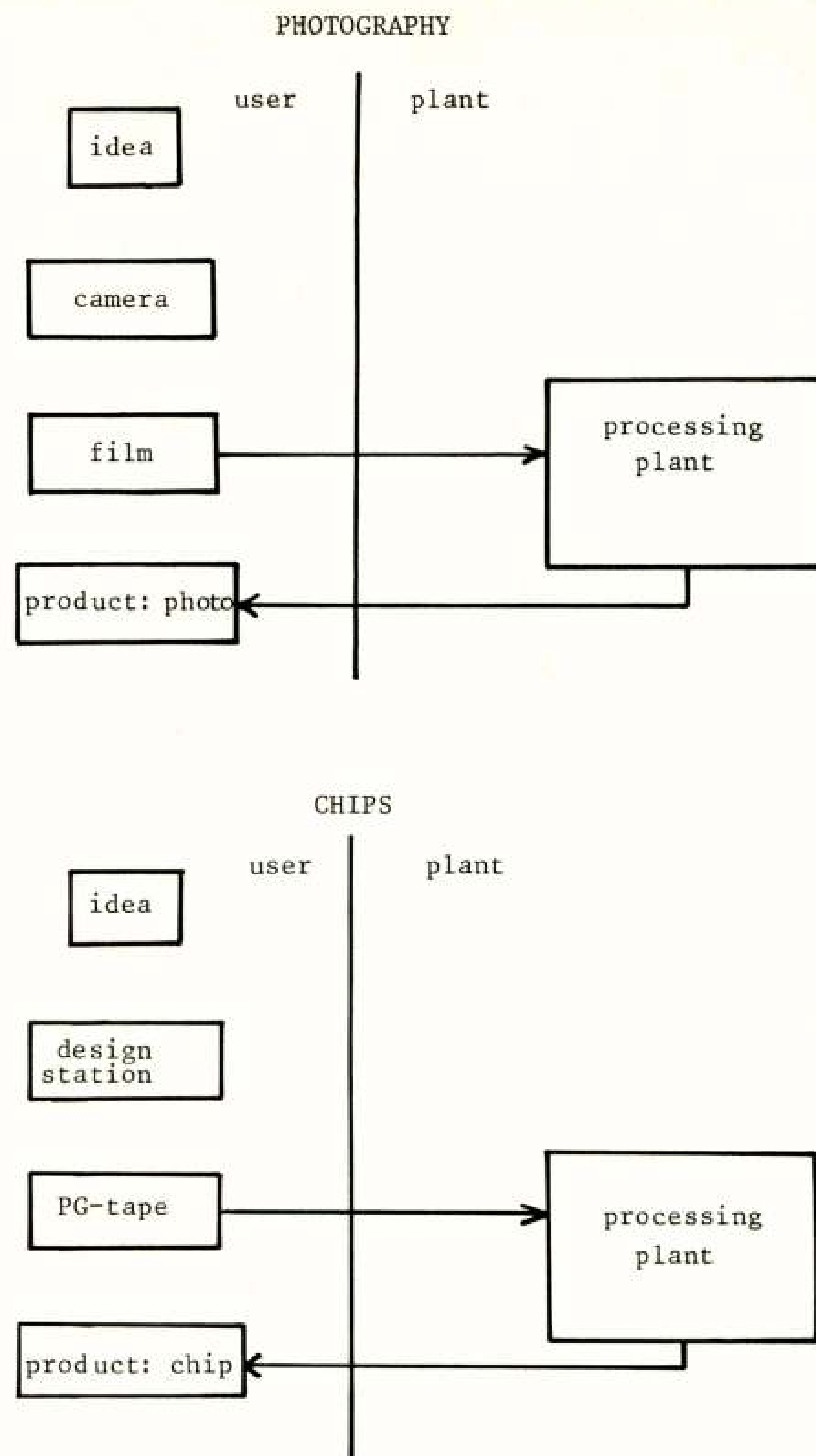


Fig. 1: Het silicon foundry idee: hetzelfde als de professionele fotografie van tegenwoordig?

"Silicon Foundry" die de informatie van de PG-tape omzet in afgewerkte geïntegreerde circuits. De IC-designer wordt in principe onafhankelijk van de chip producent. Deze laatste hoeft zelfs niet eens te weten wat de functie en het doel van de chip is. Het ontwerpend bedrijf kan de relevante informatie over het produkt voor zich houden. Sommige chipproducenten stellen voor, dat de ontwerpende bedrijven gebruik (kunnen of moeten) maken van de design faciliteiten geleverd door de chipproducent. Zij motiveren dit met allerhande kwaliteits-redenen. Deze werkwijze is m.i. niet gezond - het geeft een ongeoorloofde economische macht aan de chipproducent, die hierdoor een wurgende greep krijgt op zijn klanten. *De designer, zijn design systeem, zijn expertise en de informatie over zijn produkten moeten onafhankelijk zijn van de chipproducent.*

Dit gegeven maakt de definitie van een duidelijke interface tussen de designer en de foundry noodzakelijk. Deze interface bestaat uit drie componenten:

* ontwerpregels en PG-tape formats;

* kennis over procesparameters en de elektrische modellen van de componenten waaruit de chip is samengesteld;

* overeenkomst over de acceptatie van een ontwerp: duidelijke scheiding van de verantwoordelijkheid van de ontwerper en de silicon-foundry.

b. *Waar zijn de experts?*
Buiten de IC-produktie centra van de firma Philips zijn er niet zo heel veel experts op het gebied van Computer Aided Circuit Design en IC-ontwerp te vinden. Bij de drie TH's bestaan groepjes onderzoekers die zich met het vakgebied bezig houden. Aan de TH-Eindhoven is er een vakgroep op het gebied van CACD met een internationale reputatie. Bij de twee andere TH's wordt het onderzoek op dit gebied verricht door leden van andere vakgroepen of in het kader van een werkgroep (de werkgroep ICD in Delft). Bij de TH-Delft is een IC-Atelier, dat ieder jaar ca. 50 verschillende types IC's produceert, meestal van analoge aard. Daar de IC expertise bij Philips niet vrij ter beschikking staat van het Nederlandse bedrijfsleven, moet deze expertise verder worden opgebouwd bij de TH's en HTS'en en vandaar vloeien naar het bedrijfsleven via een groeiende groep goed opgeleide ontwerpers. Universiteiten en kleinere bedrijven kunnen gebruik maken van hetzelfde ontwerpsysteem. Er bestaat een nauwe relatie tussen technische innovatie en de opleiding met research in het wetenschappelijk onderwijs. De Nederlandse TH's moeten de rol van motor spelen in een technology-push omgeving.
Ze moeten daarvoor ook de middelen krijgen.
Bij de discussies rond de W.U.B. en de T.V.C. wordt het technology-push karakter van de universiteiten wel eens over het hoofd gezien.

c. *Moderne Technieken: Informatica en IC-technologie*
De moderne informatica stelt middelen ter beschikking die het ontwikkelen van ingewikkelde programmatuur sterk kan vereenvoudigen. Een voorbeeld is de compiler-generator: dit is een programma dat een compiler genereert voor een door de gebruiker gedefinieerde taal. Opslag van chip data en communicatie ervan gebeurt veelal in allerhande beschrijftalen. Daarom kan het gebruik van een generator heel wat manjaren ontwikkeltijd besparen. Een tweede voorbeeld is de evolutie van bedrijfsystemen. De opkomst van UNIX heeft bewezen, dat het mogelijk is een bedrijfsysteem te ontwerpen, dat overdraagbaar is (portabel) van het ene machinetype naar het andere, systematisch is opgezet en helder voor de gebruiker. Een derde voorbeeld: de nieuwe hoge programmeertalen die het mogelijk maken om programma's gestruktureerd en compact te schrijven. NELSIS wil van deze nieuwe hulpmiddelen uit de informatica gebruik maken, om de ontwikkeltijd van programma's kort te houden en het systeem overzichtelijk en hanteerbaar te maken.
In NELSIS is impliciet gekozen voor UNIX als basisomgeving met hogere programmeertalen als C, Pascal en Lisp (FORTRAN 77 is ook toegelaten). In de UNIX omgeving zijn compilergeneratieprogramma's (Yacc en Lex) als functies beschikbaar.

Naast de moderne informatica spelen ook nieuwe VLSI chips als krachtige microprocessoren een belangrijke rol. De verwerkingscapaciteit van een microcomputer is de laatste jaren sterk toegenomen. Voorbeelden hiervan zijn de M68000 en de CPU van het HP9000 systeem: een chip die 450000 transistors bevat.
Met de toename van goedkope geheugencapaciteit in de vorm van MOS geheugens en Winchesterschijven en met de nieuwe rasterscan (zeer intelligente) grafische terminals, komt men tot zeer krachtige lokale systemen, opgebouwd uit de zojuist vermelde elementen. Deze werkstations kunnen nagenoeg alle CACD funkties aan en bieden een volledige hardware ondersteuning van de taken van een ontwerper. Van belang is, dat ook de software - het CAD systeem - de ontwerper inzicht biedt in zijn taak - het mag niet een "black box" zijn, die een bepaald aantal taken op mysterieuze wijze verricht. Werking en functie van de componenten en de programma's in het werkstation moeten voor de ontwerper volmaakt helder zijn zodat hij op ieder ogenblik zijn instrument aan zijn behoefte kan aanpassen. Toepassing van de hierboven genoemde moderne informatica maakt dit mogelijk.

d. *De noodzaak tot samenwerken.*
Eén IC ontwerpen is een complexe zaak. De ontwerper vertrekt vanuit de specificaties die hem opgegeven worden. Een klant wenst een chip die een aantal dingen kan doen (functionele specificaties) op een bepaalde manier (fysische specificaties). Bijvoorbeeld men wil een spraakprocessor voor compressie van menselijke spraak met als doel die spraak efficiënt op een geheugenschijf te coderen. De spraakprocessor volgt een bepaald rekenschema (functionele specs) en moet dit schema afwerken in "real time" (fysische snelheidspecificatie). Verder wordt geëist, dat het gehele systeem op één chip wordt aangebracht.

De andere zijde die de ontwerper moet bereiken is de Silicon Foundry. Hieraan moet de ontwerper een PG-tape afleveren. Hij moet functionele en fysische specificaties vertalen naar een lijst van instructies die het fotomasker-apparaat in de foundry aandrijft. Tenslotte moet hij er ook voor zorgen, dat zijn pro-

dukt testbaar is en voldoet aan de acceptatieprocedures die zijn overeengekomen tussen enerzijds de ontwerper en zijn opdrachtgever en anderzijds de ontwerper en de siliconfoundry.

Het vertalen van functionele specificaties naar een geometrie op een silicum plak kan helemaal automatisch gebeuren indien gebruik wordt gemaakt van een of andere "Silicon-assembler" of "Silicon-compiler" die rechtstreeks functie vertaald naar geometrische specificaties. Meestal zal een chip die op die manier is ontworpen echter niet aan de gestelde fysische eisen voldoen. Indien bijvoorbeeld gebruik wordt gemaakt van een bibliotheek van standaard cellen, ontstaat een chip waarvan de oppervlakte zeer slecht wordt benut, omdat de technologische mogelijkheden van het gebruikte proces niet op een efficiënte manier zijn uitgebuit (de relatie "functie" vs "implementatie" is zoek). Een andere mogelijkheid om automatisch te ontwerpen staat bekend als de "Mead en Conway-aanpak". Deze methode genereert automatisch een layout vanuit functionele specificaties gebruikmakend van een vereenvoudigde verzameling ontwerpregels. Hierbij ontstaat een chip die elektrische specificaties, i.h.b. snelheidseisen, meestal niet haalt. Een ontwerp maken, dat aan alle eisen voldoet blijkt een ware kunst te zijn. De ontwerper volgt een methode die itereert tussen synthese en verificatie. Hij maakt gebruik van de automatische synthese-middelen om snel tot een eerste ontwerp te komen. Daarna moet hij met behulp van simulatie- en verificatieprogramma's de fysische eigenschappen van zijn ontwerp natrekken. Op basis van die gegevens brengt hij modificaties aan, en gaat hij weer verifiëren, etc. etc. tot hij een bevredigende oplossing heeft gevonden. Bij iedere stap gebruikt hij allerhande applicatieprogramma's om het oerwoud aan gegevens die hij bij een vorige poging heeft gegenereerd te wijzigen, te transformeren en te verifiëren.

IC-data bestaan uit een groot aantal data-bestanden. Ieder bestand beschrijft het IC op een bepaalde manier - men zegt: op een bepaald niveau van abstractie.

Figuur 2 geeft een overzicht van de abstractieniveaus die op dit ogenblik gebruikt worden. Ook neerwaartse (synthese) beweging en opgaande (verificatie) beweging is aangegeven.

In het werkstation van de ontwerper zijn meestal de volgende bestanden aanwezig:

* Bestanden die een bepaalde chip beschrijven:
  - het idee en de algemene informatie over de chip (auteur, methode, doel).
  - een functionele beschrijving van de chip met een beschrijving van de implementatie van de functie in de vorm van een "floor plan".

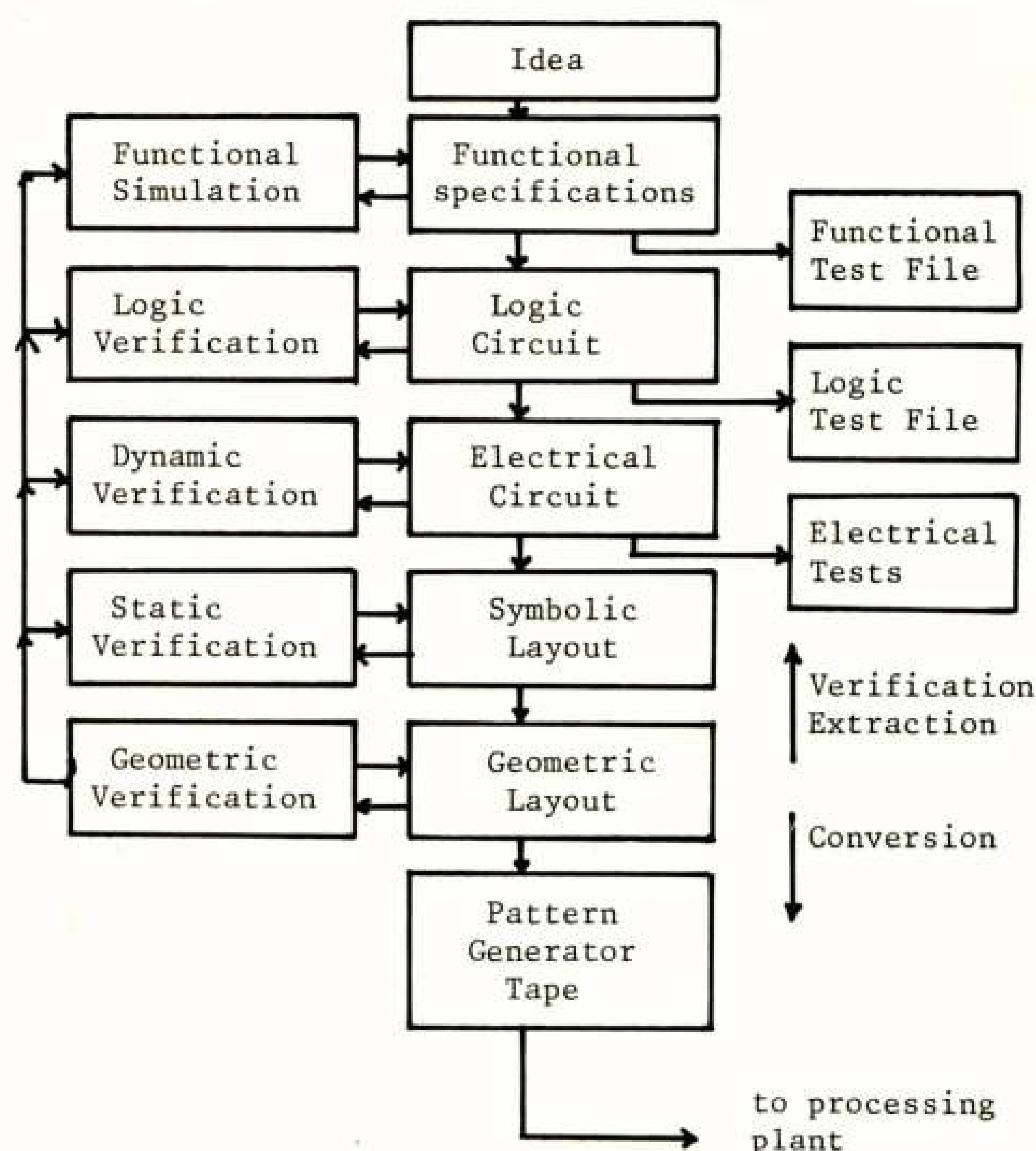


Fig. 2: Abstractie niveaus van het ontwerpproces.

  - een bestand met de logische of systeembeschrijving: de wijze waarop onderdelen met elkaar verbonden zijn, de controle en de dataflow;
  - een elektrische beschrijving: hoe het elektrische circuit eruit ziet.
  - een geometrische beschrijving (layout): de beschrijving van de geometrische patronen op de chip.
  - testdata: gegevens om de chip te kunnen testen met een test-apparaat.

* Bestanden die fabricatie data beschrijven.
  - een bestand met de ontwerpregels.
  - een bestand met parameters van het process en elektrische modellen van de componenten.

Alle CACD programma's verrichten een of andere taak op een of andere beschrijving van het IC. Bijvoorbeeld zal een circuit simulator als SPICE een elektrische simulatie uitvoeren op een circuit beschrijving (elektrische simulaties zijn belangrijk bijvoorbeeld bij het bepalen van de snelheid van het IC). Wil een ontwerper elektrisch simuleren, dan moet hij op een of andere manier de invoer van SPICE uit de beschikbare data genereren. Dit gebeurt tegenwoordig meestal met de hand en kost een zee van tijd. Wil men het automatisch doen, dan moet men beschikken over een programma, dat geometrische data vertaalt in een elektrische beschrijving die dan aan SPICE kan worden

aangeboden (een "extractor"). Van groot belang is, dat de invoer en de uitvoer van de data van verschillende programma's met elkaar compatiebel zijn, zodat data-conversie tussen programma's wordt vermeden. Gezien de complexiteit van de chip en de grote hoeveelheid data is dit niet een eenvoudige zaak. NELSIS geeft voor dit probleem een oplossing die verder wordt beschreven.

Van cruciaal belang bij het opzetten van een VLSI design systeem is *het beheersen van de complexiteit* van de data. We doen dit door *systematisch gebruik te maken van de struktuur van de chip*. Een chip bestaat uit een hiërarchie van geometrische bouwelementen. Bijvoorbeeld bevat een bouwsteen "Arithmetische eenheid" (AU) een aantal subbouwstenen, "controle eenheid", "bus", "register", "array multiplier". Deze laatste bestaat op zijn beurt uit een matrix van nog meer elementaire bouwstenen genaamd "full adders" die zelf opgebouwd zijn uit een collectie van een tiental elementaire cellen. Figuur 3 illustreert een dergelijke hiërarchische keten.

Voor ieder van de bouwstenen in de hiërarchie zijn er beschrijvingen op verschillende niveaus van abstractie. De niveaus zijn: functioneel, logisch, circuit en geometrisch. We structureren de chip-data als een hiërarchische verzameling van beschrijvingen op verschillende niveaus, in het Engels: "a multilevel hierarchical system of files". *Wil men een consistent ontwerpsysteem, dan moet ieder programma eenzelfde bestanden-systeem kunnen gebruiken als invoer of uitvoer*. NELSIS stelt een dergelijk standaard bestanden-systeem voor.

De grote verscheidenheid aan programma's nodig om het ontwerp te beheersen maakt een coöperatieve aanpak noodzakelijk: ontwerpers verenigt u! Coöperatie is alleen mogelijk als er een basis bestaat waarop gezamenlijke ontwerpprogrammatuur wordt ontwikkeld. Die basis bestaat uit:

* een standaard, internationaal erkend en kwalitatief hoogstaand bedrijfsysteem voor de ontwerpstations: UNIX;
* een gestandaardiseerde opbouw van het hiërarchisch multilevel bestand zodat iedere ontwikkelaar en ontwerper een helder inzicht heeft in de struktuur van de data.

Alle applikatieprogrammatuur maakt gebruik van hetzelfde gestruktureerd databestand.

De coöperatief te ontwikkelen collectie applicatie-programma's zijn minimaal de volgende:

i. Interactieve hulpmiddelen voor de creatie en het onderhouden van de chip-data:
layout en circuit editors, interactieve plaatsing en routing;

ii. Programma's voor verificatie en simulatie
- electrische circuit simulatie;
- logische circuit simulatie;
- functionele simulatie;
- circuit verificatie;
- logische verificatie;
- functionele verificatie;
- verificatie van ontwerpregels (DRC = design rule checking).

iii. Programma's die één IC beschrijving vertalen in een andere.
- extractie: conversie van layout data naar circuit elementen;
- synthese: conversie van systeem functies in hetzij circuit data, hetzij lay-out; silicon compilatie, silicon assemblage, generatie van geparametrizeerde bouwstenen.

iv. Het genereren van testdata en procedures

v. Ondersteunende programmatuur
- beheer van databestanden en bibliotheken
- didaktische hulpverlening, documentatie en instruktie.

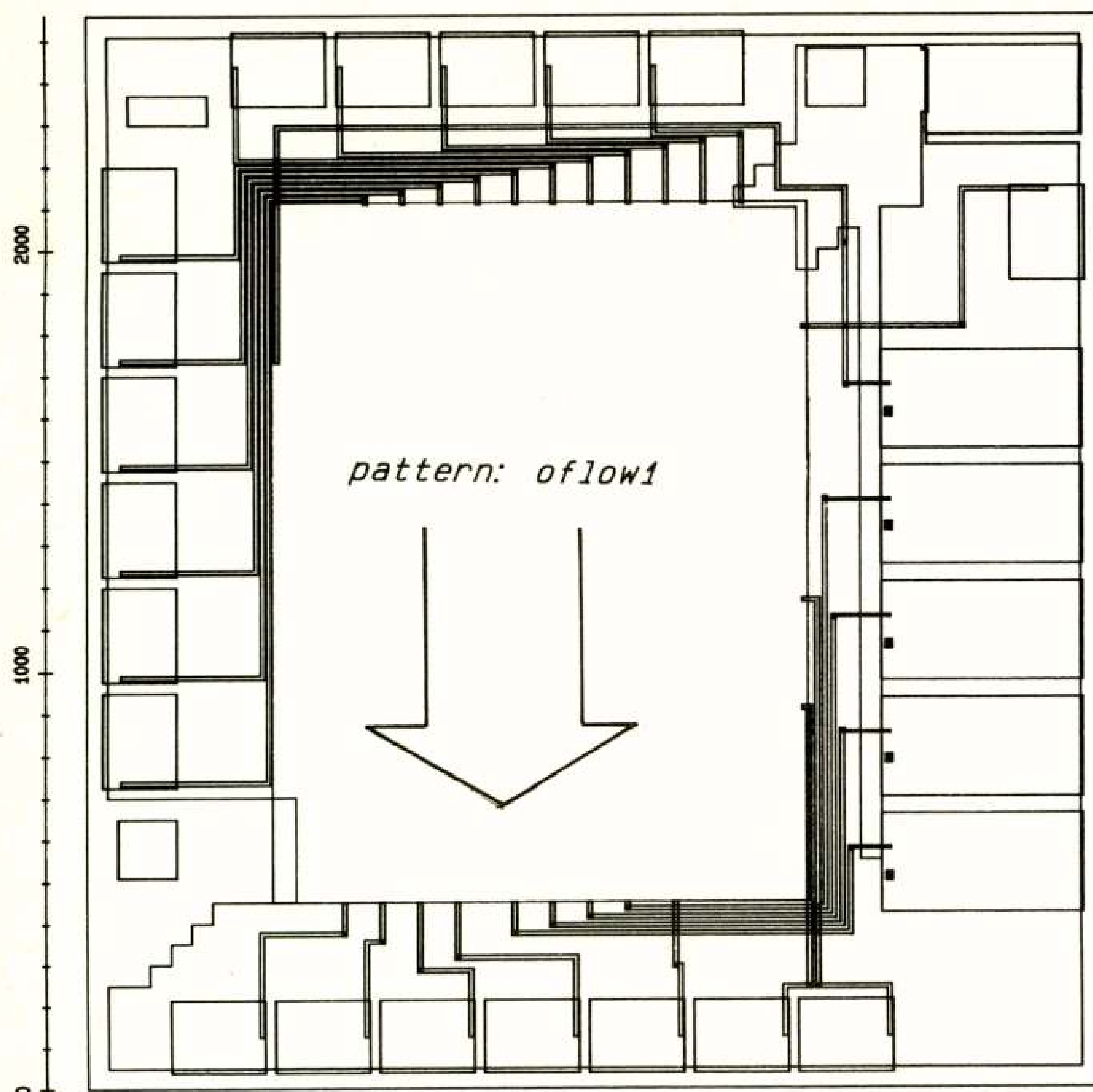
e. *Evolutie van het vakgebied CACD*

Men kan stellen, dat het vakgebied computer aided design en zekere graad van wetenschappelijke maturiteit heeft bereikt. De IEEE heeft naast de Transactions on Circuits and Systems, een nieuwe "Transactions on the Computer Aided Design of Electronic Circuits" opgericht, waarin wetenschappelijk werk in CACD wordt gepubliceerd. Vele andere wetenschappelijke verenigingen organiseren colloquia en publiceren werk in dit vakgebied. Allerhande algoritmen genieten een goede bekendheid en zijn makkelijk te implementeren dankzij deze publikaties. Er ontstaat een gigantische collectie aan methodes en mogelijkheden waar een ontwerper dankbaar gebruik van kan maken. Hij is niet langer meer aangewezen op allerhande ondoorzichtige programma's die met wat hokus pokus een en ander voor hem klaart zonder zijn fundamentele probleem, complexiteitsbeheersing, op te lossen. Misschien wordt de CACD wel als de Numerieke Analyse: een gevestigd vakgebied met een aanvaarde methodologie.

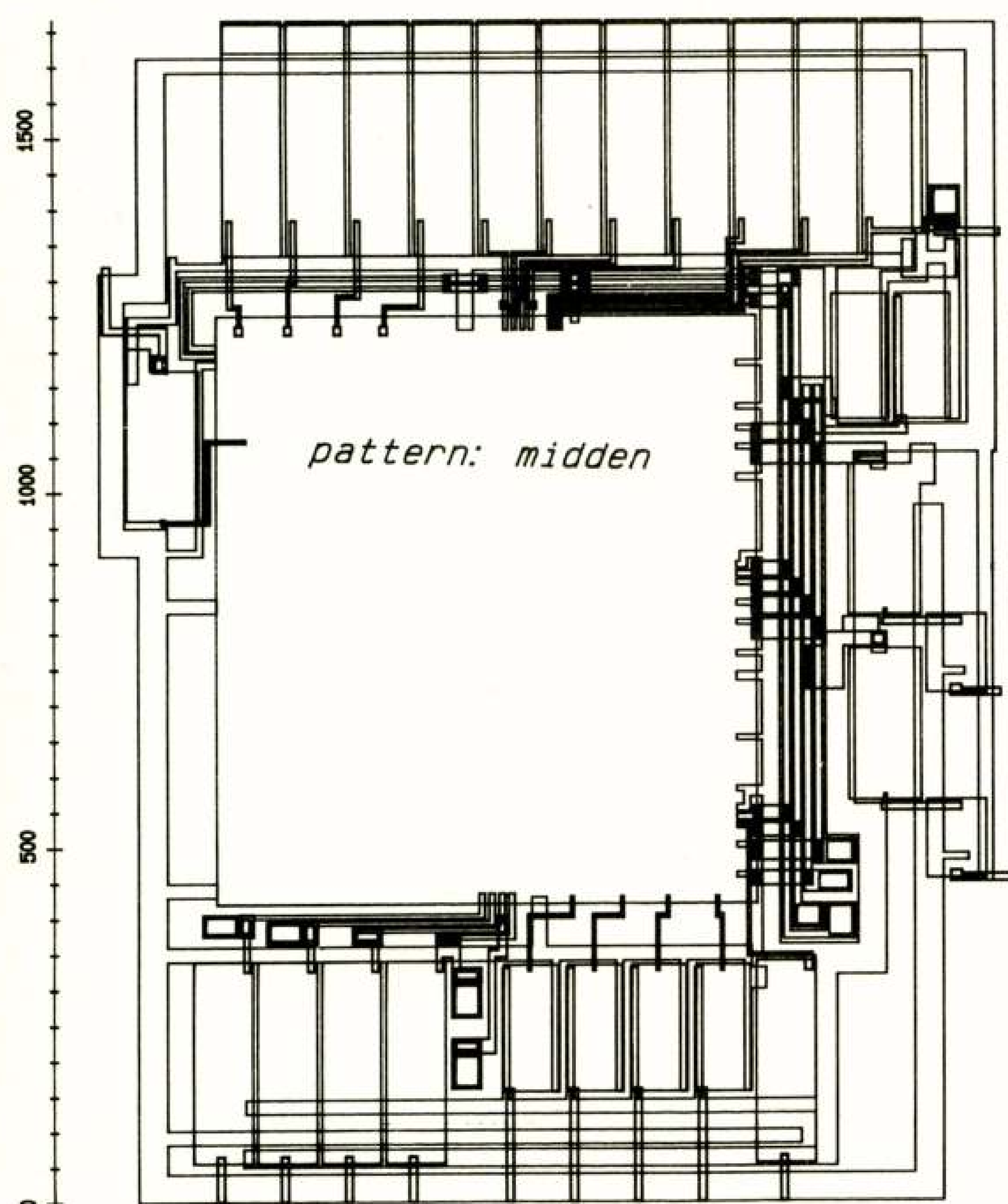
3. DE NELSIS PROBLEMATIEK

De NELSIS problematiek kan in een notedop worden samengevat in de volgende stellingen:

* Er is een onvoldoende aantal IC-ontwerpers in Nederland;
* Er is een onvoldoende aantal specialisten op het gebied van het computer gestuurd ontwerpen van grote



pattern: alles2
1 mm = 15.754 micron



pattern: oflow1
1 mm = 10.246 micron

Fig. 3: Twee lagen in een hiërachische layout van een arithmetische processor; oflow 1 is een bouwsteen in alles 2 terwijl midden een bouwsteen is in oflow 1 (ICD-systeem TH Delft, de kleuren zijn jammer genoeg niet hier weergegeven; ontwerpers R. Nouta and A.C. de Graaf).

geïntegreerde circuits (VLSI).

De infrastruktuur op het gebied van de microelectronica en in het bijzonder de CACD is onderontwikkeld zowel bij KMB's (kleine en middelgrote bedrijven), als bij de TH's en HTS'en.

De TH's leiden een onvoldoende aantal promovendi op - de research infrastruktuur is onvoldoende, vooral in de technische vakken.

LSI en VLSI stelt nieuwe complexiteitsproblemen aan de CACD. De meeste CACD taken moeten met nieuwe inzichten en methoden worden aangepakt om de complexiteitsproblematiek het hoofd te kunnen bieden. Er zijn bijna geen onafhankelijke design houses in Nederland. Wil men het ontwerpen van IC's bij de KMB's zijn intrede laten doen, dan zal men de KMB's en in het bijzonder de design houses moeten helpen met kennis, expertise en infrastruktuur. Alleen jonge, goed-opgeleide ingenieurs zijn in staat dit te leveren. Een goed functionerend algemeen bruikbaar systeem moet hierbij helpen.

4. DE NELSIS OPLOSSING

NELSIS is een kaderovereenkomst, dat een coöperatief systeem voor het ontwerpen van geïntegreerde schakelingen mogelijk maakt. Participanten in de kaderovereenkomst zijn: de CACD groeperingen in de TH's, de overheid als financierende instantie, de FOM Werkgemeenschap Halfgeleiders als begeleidende en beoordelende instantie, meewerkende software bedrijven die voor de industriële ondersteuning van het programma moeten zorgen en gebruikers (onderwijsinstellingen en design houses). De kaderovereenkomst bestaat uit de volgende elementen:

a. *Een standaard LSI-design omgeving*

- Standaard is het bedrijfsysteem UNIX. Dit is een portabel bedrijfsysteem opgezet als een filebeheerssysteem en ondersteund door vele computer fabrikanten, w.o. Hewlett Packard en recent ook IBM.
- Een standaard hiërarchisch, 'multiniveau' bestand dat de IC data beschrijft.
- Een verzameling standaard communicatietalen afgesproken tussen de gebruikers en compatiebel met de standaarden geldig binnen Philips.

b. *Een methode om de CACD/VLSI infrastruktuur op te bouwen* via een investering in werkstations en ontwikkelsystemen bij de TH's en een netwerk tussen de ontwikkelaars en de gebruikers. De voorgestelde infrastruktuur is een absolute noodzaak wil Nederland kunnen beschikken over het jonge talent nodig om dit cruciale vakgebied op niveau te krijgen.

Met de keuze van UNIX als standaard bedrijfsysteem voor zowel het ontwikkelsysteem als de werkstations ontstaat een omgeving waarin ontwikkelaars optimaal zijn ondersteund. Daar de vele taken van een CACD systeem te maken hebben met bewerkingen op textuele bestanden, is het aangewezen om de programmeertaal "C" te gebruiken. Deze taal laat toe, makkelijk te "rekenen" op bestanden omdat ze beschikt over een uitgebreide "pointer-algebra". Andere gestruktureerde programmeertalen als PASCAL en FORTRAN 77 zijn ook toegelaten. Ervaring met C als ontwikkeltaal is uiterst gunstig. Een afstudeerder van de vakgroep Netwerktheorie in Delft schreef een krachtig extractieprogramma in ca. 5 maanden tijd. Hetzelfde programma (met een minder geavanceerd algoritme) vroeg 5 manjaren. Een investering in een infrastruktuur die is opgezet op basis van een internationaal erkende software-omgeving moet optimaal vruchten dragen.

c. *Ontwikkeling van Algoritmes voor applicatieprogramma's*

CACD is een wezenlijk onderdeel van de moderne microelektronica. Het onderwerp van het vak is "grote geïntegreerde circuits" (VLSI chips).

Nederland beschikt over een aktieve werkgemeenschap die de wetenschappelijke en technische aktiviteiten op het gebied van de microelektronica coördineert - de FOM Werkgemeenschap Halfgeleiders. Het vakgebied CACD hoort thuis in die werkgemeenschap omdat het een wezenlijk onderdeel is van de microelektronica. In NELSIS is een extra subsidiëring van die Werkgemeenschap voorzien om ca. 12 promovendi te ondersteunen. Researchers kunnen projekten indienen bij de Werkgemeenschap om als onderdeel van NELSIS programmatuur te ontwikkelen. Aanvragers moeten bewijzen dat ze voldoen aan de door het NELSIS programma gestelde normen m.b.t. standaarden en methoden van werken. De aangevraagde projekten worden geëvalueerd volgens de procedures die gebruikelijk zijn bij FOM - m.n. internationale beoordeling op hoog wetenschappelijk niveau. 12 promovendi plus 12 medewerkers gedurende 4 jaar die allen full-time aan het systeem werken leveren 96 manjaar ontwikkeltijd. Met die orde van grootte aan totale inspanning slaagt men er ongetwijfeld in de gestelde doelstelling te verwezenlijken.

d. *Een methodiek van transfer*

NELSIS heeft tot uitdrukkelijk doel een transfer van aan de universiteiten ontwikkelde programma's naar een grote groep kleine industriële ontwerpers tot stand te brengen. Met de huidige computer-hardware werkstations en office computers, kan een individuële ontwerper met geringe kosten (bv. ƒ 60.000) zich een krachtig werkstation aanschaffen. Fig. 4 toont een prototype werkstation. Het station bevat voldoende rekencapaciteit, werkgeheugen en achtergrondgeheugen om alle design programma's te runnen. Via het net kan hij alle functies die hij zou wensen in zijn systeem halen.

Met behulp van de grafische monitor kan hij zijn ontwerp interactief genereren, en de resultaten van verificatieprogramma's interpreteren.

Onder NELSIS komt ieder stukje software, waar dan ook ontwikkeld, ter beschikking van iedere ontwerper. Hoge kwaliteit van de programmatuur wordt verkregen door gebruik te maken van de diensten van een softwarebedrijf, dat goede universiteitsprogramma's uitbouwt tot produkten die aan de normen van de industrie voldoen. Tevens zal het bedrijf de ontwikkelde programma's ondersteunen. We denken, dat het best meevalt met de ondersteuning dankzij de hoge kwaliteit van de software ontwikkeld op het UNIX systeem. Het Delftse systeem beschikt op dit ogenblik over ca. 100 CACD functies. De meeste van deze functies behoeven nauwelijks enige ondersteuning.

5. PROTOTYPERING

In het kader van de VLSI aktiviteiten van de werkgroep ICD aan de TH Delft, zijn experimenten ondernomen met een systeem, dat kan dienen als een prototype voor NELSIS. Een hiërarchisch multiniveau data file management system werd gedefinieerd op de VAX 11/750 machine en een commandotaal voor het systeem. Het oorspronkelijk ontwerp van het DFM systeem is van Dr. E. de Doncker, samen met de studenten Singh en Sennema [3].

De struktuur van het systeem staat op fig. 5. De rechthoeken staan voor "directories" die verwijzingen bevatten naar andere directories of naar databestanden. We hebben hier een twee-niveau hiërarchie. Het bovenste niveau is het "project" niveau dat een verzameling bevat van de "modellen" - de bouwstenen waaruit de chip hiërachisch is opgebouwd. Iedere bouwsteen bestaat uit een aantal beschrijvingen ervan, "views". Essentieel zijn: de mod-up view, die een lijst geeft van alle modellen waarin het gegeven model voorkomt als submodel en de mod-down view met alle submodellen van het gegeven model. Deze twee files definiëren de bouwsteen-hiërarchie. Verder kunnen voorkomen, per bouwsteen of model: een layout beschrijving in een of andere layout taal (CMSK, GDL, Voila, CIF ...), een circuit beschrijving, een functionele beschrijving, testbestanden etc. Deze files geven het multiniveau karakter aan van mogelijke chipbeschrijvingen. Noteer, dat de opeenvolgende views zelf eventueel systeemdirectories kunnen zijn. Het is niet verstandig om het aantal systeemniveaus te zeer uit te breiden.(In een nieuw voorstel zijn vier niveaus gedefinieerd.)Het is ook mogelijk om een of andere view "intern" als een directory te karakteriseren, en verder uit te splitsen in een diepte van hiërarchieën en views. Naast het data-systeem hebben we, als onderdeel van het NELSIS prototype systeem, een aantal originele applicatieprogramma's ontwikkeld. Naast allerhande drivers voor interfaces heeft de groep een programma ontwikkeld voor

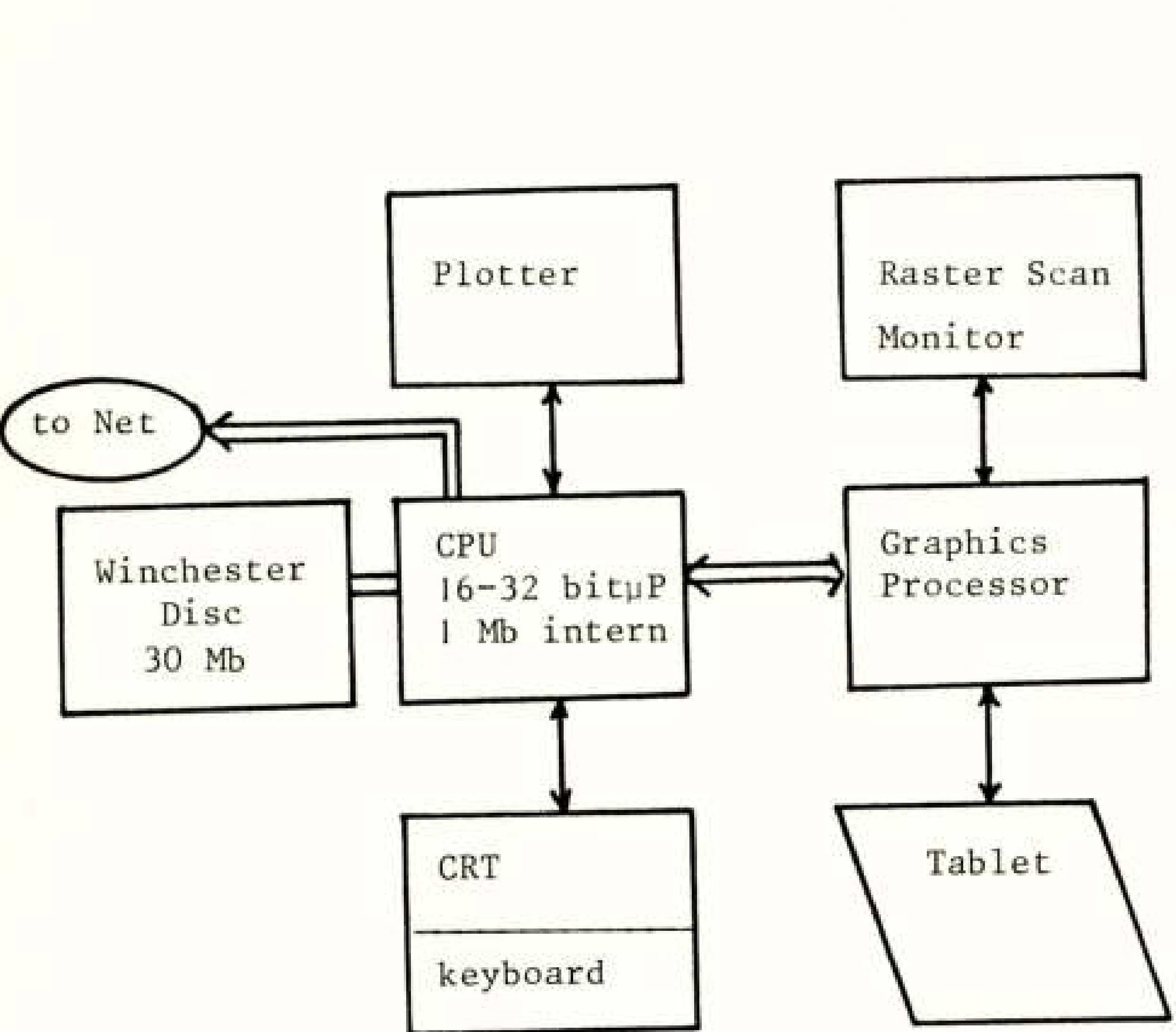


Fig. 4 Het prototype gebruikers-werkstation. Bedrijfsysteem: UNIX.

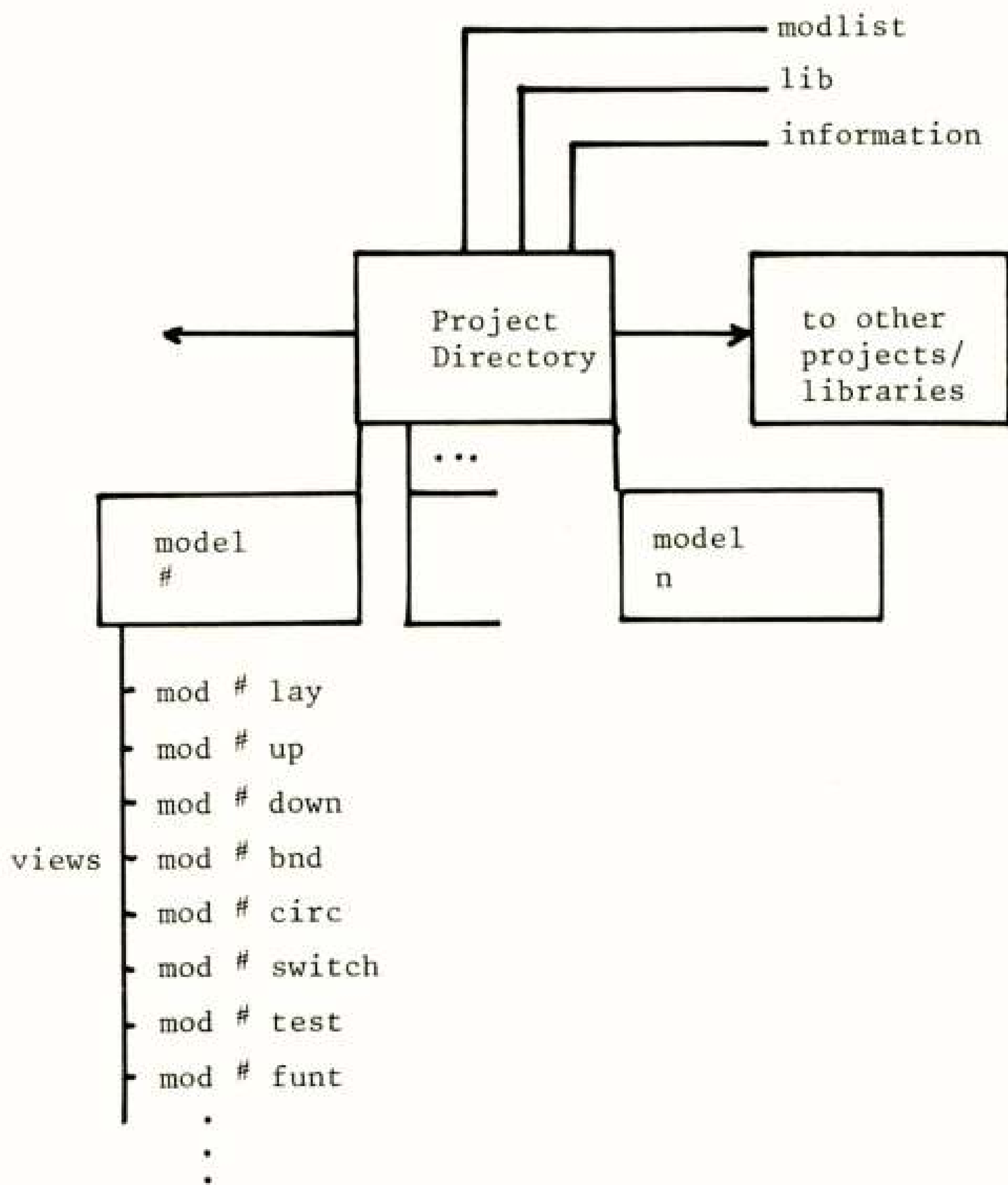
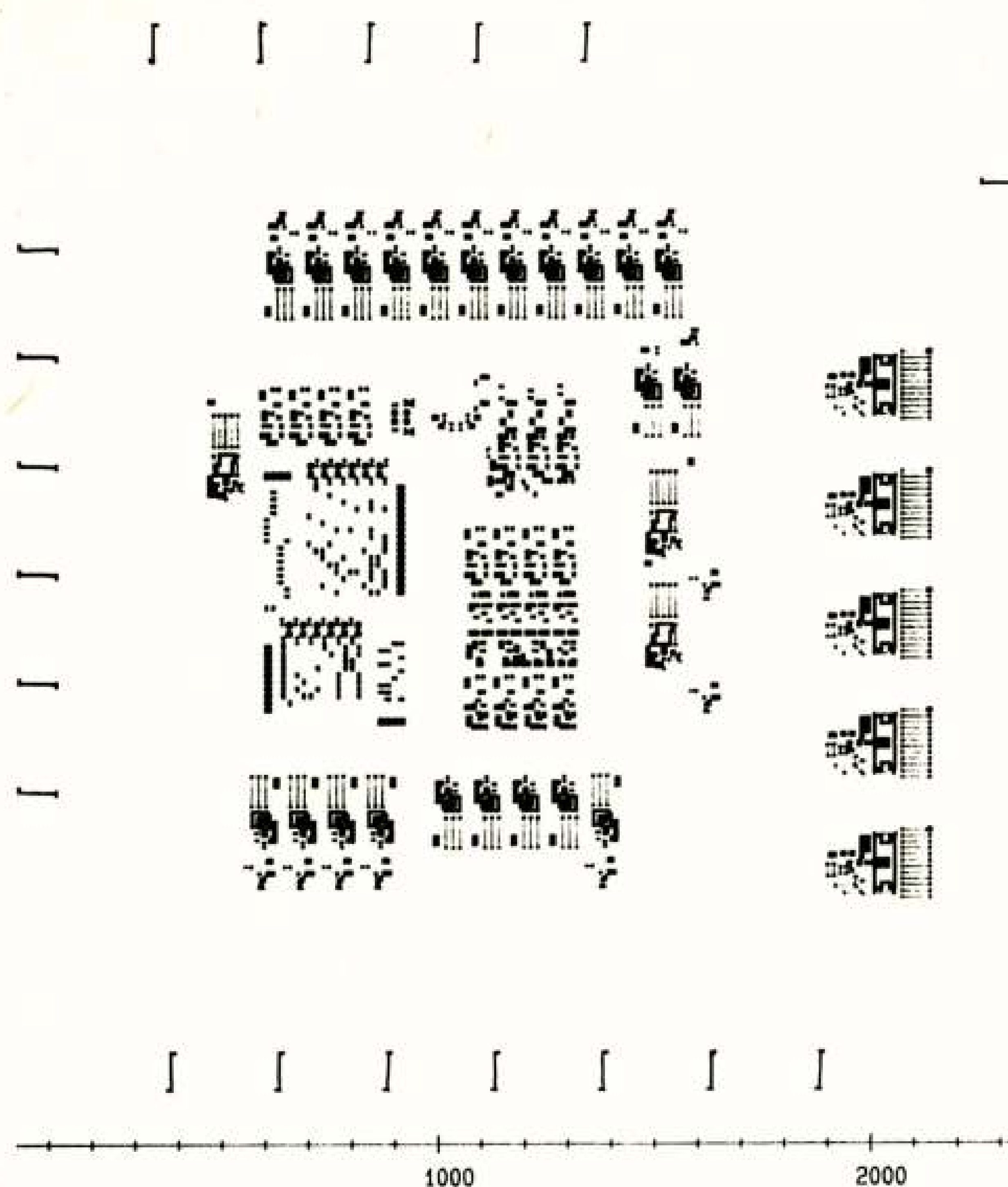


Fig. 5. De struktuur van het datafile management systeem.



pattern: trans
1 mm = 20.000 micron

Fig. 6. Resultaat van de funktie 'Nbool' (auteur R. van Leuken) toegepast op alles 2 van fig. 3; Nbool haalt hier de transistors uit het circuit, een essentieel programa, bij het verifiëren van de ontwerpregels (design rule checking).

(hiërarchische) design-rule-checking en een programma voor extractie van het circuit uit de geometrie. Beide programma's zijn gebaseerd op een uiterst efficiënt systeem van scanning van de geometrische features [4]. Verder is er ook nog een programma voor generatie van subsystemen i.h.b. PLA's [5].
Als voorbeeld van de werking van een applicatie programma, staat in fig. 6 een plot afgebeeld van alle transistoren die voorkomen in het circuit alles 2 van fig. 3, gegenereerd door 'Nbool' van R. van Leuken.

Het NELSIS prototype systeem wordt nu reeds door een groot aantal ontwerpers gebruikt, ca. 100. Dit laat ons toe om een duidelijk idee te krijgen van de mogelijkheden en de beperkingen van het systeem. Bij de implementatie wordt intens gebruik gemaakt van de compiler generator YACC en van de lexicale analyzer LEX - beide programma's die met het UNIX systeem mee worden geleverd en in staat zijn om automatisch grote stukken programmatuur te genereren.

5. CONCLUSIE

Aan de eisen: een coöperatief systeem op te zetten voor het computer-gestuurd ontwerpen van grote geïntegreerde circuits met de eigenschappen:

- protabiliteit op OS niveau,
- helderheid
- flexibiliteit
- modulariteit
- distributiviteit
- additiviteit
- lage kostprijs

kan worden voldaan, bijvoorbeeld met de methode voorgesteld in het NELSIS systeem. Het gebruik van moderne informatica voor het ontwikkelen van de tools en van VLSI hardware in de vorm van krachtige doch goedkope werkstations maakt het mogelijk om het vak "VLSI ontwerpen" in het bereik te brengen van de kleine onderneming of de onafhankelijke ontwerper die daarna zijn ontwerp stuurt naar een silicon foundry voor prototypering en productie: dankzij VLSI, VLSI!

Er is ruimte voor een rijk CACD leven aan de TH's en bij de bedrijven op een plezierige, verdeelde manier Het technisch-wetenschappelijk niveau wordt gewaarborgd door de Werkgemeenschap Halfgeleiders die een weloverwogen subsidiëringspolitiek van jong talent bij de universiteiten verzorgt.

VLSI-ontwerpen is van het grootste belang voor het Nederlandse bedrijfsleven. Een slimme chip in een produkt kan succes garanderen. In een land met hoge lonen en een kostbaar sociaal apparaat moeten de inkomsten komen van de hogere functionele kwaliteit. In Nederland kampen we met een onvoldoende aantal promovendi, een gebrekkige infrastruktuur en weinig ondernemingslust bij de bedrijven. Misschien kan NELSIS een stimulans geven in een goede richting.

BIBLIOGRAFIE

1. P. Dewilde, J. Jess, O. Memelink en E. van Utteren, NELSIS (NEderlands ontwerpSysteem voor geIntegreerde Schakelingen), FOM WG Halfgeleiders, 1982.

2. C. Mead and L. Conway, "Introduction to VLSI systems", Addison-Wesley Pub. Comp., 1980.

3. E. de Doncker e.al., "ICD: a system for interactive computer aided IC design", Dept, of Electrical Engineering, Delft Univ. of Techn., 1982.

4. J.T. Fokkema and T.G.R. van Leuken, "An Efficient, line-oriented database for VLSI Circuit Verification based on a linear algorithm", Dept. of Electrical Engineering, Delft Univ. of Techn., 1982.

5. A.C. de Graaf and R. Nouta, "Layout Generation of PLA based Circuits from a Register transfer description", Dept. of EE, Delft Univ. of Techn., 1982.

Voordracht gehouden tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 309), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie, op 7 oktober 1982 in het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven.

ELECTRO MAGNETIC COMPATIBILITY

Ing. A. de Jong
Dr. Neher Laboratorium PTT

A survey is given of the specific fields in which Electro Magnetic Compatibility (EMC) plays an important role and of the various aspects which determine EMC cases, such as characteristics of interference sources, coupling paths, interference victims, frequency range, etc. Some general principles to tackle interference problems are indicated and at the end a review is given of international and national organizations and rules which are relevant for the abatement of interference.

INLEIDING

Electro Magnetic Compatibility, het thema voor deze serie lezingen, kan vrij worden vertaald door: "het ongestoord samenleven van elektrische systemen". Hierbij moet worden opgemerkt dat EMC zich uitstrekt tot alle elektrische systemen, hoewel de gebieden die hierna in afzonderlijke lezingen worden behandeld, zich beperken tot elektronische systemen.

Om een globaal beeld te geven van het zeer uitgebreide gebied van EMC worden hierna eerst de belangrijkste aspecten van EMC belicht, waarna een kort overzicht wordt gegeven van de maatregelen die kunnen worden getroffen om EMC te bewerkstelligen en de wijze waarop dit is georganiseerd.

AFBAKENING VAN HET TERREIN

De belangrijkste gebieden waarin EMC een rol speelt, zijn:

Stroomvoorzieningssystemen, elektriciteitsnetten

De taak van een elektriciteitsnet is elektrisch vermogen te leveren in de vorm van een sinusvormig signaal met constante frequentie en constante amplitude.

Door wisselende en niet-lineaire belastingen kunnen afwijkingen in de signaalvorm optreden, die resulteren in storende effecten bij de aangesloten gebruikers:

- Snelle spanningsvariaties in de vorm van transients (impulsvormige of kortstondig oscillerende spanningsgolven), die worden veroorzaakt door plotselinge belastingsvariaties (in- en uitschakelen van gebruikers).
- Langdurige vervorming van de golfvorm door niet-lineaire belastingen (transformatoren) of door periodiek geschakelde belastingen (thyristorregelaars met faseaansnijding). Deze vervorming veroorzaakt hogere harmonischen van de netfrequentie.
- Inkoppeling van vreemde signalen. Hiertoe behoren zowel opzettelijk ingekoppelde signalen (toonfrequente stuursignalen, maar ook officieel niet toegelaten signalen van babyfoons) als onopzettelijk gegenereerde stoorsignalen (stoorspectra van gebruikers veroorzaakt door collectormotoren, schakelaars en thermostaten, tijdbasissignalen van TV-ontvangers en monitoren, hoogfrequent generatoren, e.d.).

Naast de bovengenoemde effecten, die direct samenhangen met de signaalvorm van de netspanning, kan het elektriciteitsnet radiostoring veroorzaken door ontladingsverschijnselen (corona) in hoogspanningsinstallaties.

Telecommunicatiesystemen

Het niveau van telecommunicatiesignalen is dikwijls zeer laag (op bepaalde afstand van het ruisniveau) en kan daarom gemakkelijk door ongewenste signalen worden beïnvloed. De storingskans wordt in belangrijke mate bepaald door het overdrachtsmedium.

- Draadgebonden systemen (kabels en geleiders) zijn in principe niet zeer storingsgevoelig daar het signaal sterk gekoppeld is aan de geleiders en slechts zeer geringe ruimtelijke uitbreiding ondergaat. Bovendien zijn kabels vaak goed afgeschermd tegen uitwendige velden.

  Glasvezel in het bijzonder is ongevoelig voor uitwendige storende velden en wordt daarom vaak toegepast in een sterk storende omgeving.
- Radiosystemen maken gebruik van ruimtelijk uitgestraalde velden. Ongewenste stoorsignalen die in het gebruikte radiokanaal vallen en in mindere mate signalen die buiten het radiokanaal vallen, kunnen de radio-ontvangst nadelig beïnvloeden.

  Door de grote gevoeligheid van radioverbindingen voor stoorinvloeden is bestrijding van radiostoringen de oudst voorkomende vorm van EMC en hierdoor is de kennis over en de reglementering van radiostoringen veel verder gevorderd dan die van andere EMC-problemen.

Elektronica

Het niet tot de telecommunicatie behorende terrein van de elektronica is de laatste decennia sterk uitgebreid en daarmee is het aantal EMC-problemen evenredig toegenomen.

Enkele van de voornaamste deelterreinen zijn:
- dataverwerkende systemen, van kleine microprocessortoepassingen tot grote computersystemen,
- meet- en regelapparatuur,
- audio- en videotoepassingen,
- overige schakelingen.

Een andere belangrijke indeling van elektronische systemen met betrekking tot EMC is die in digitale versus analoge signaalverwerking. Beide soorten systemen verschillen sterk in gedrag zowel bij het opwekken als bij het verwerken van stoorsignalen.

Elektrische gebruikers

De niet met elektronica uitgeruste elektrische gebruikers worden voornamelijk gevormd door verwarmings- en koelingstoepassingen, verlichting, elektromechanische systemen (motoren, elektromagneten) en elektrochemische toepassingen. Deze gebruikers zijn in het algemeen zelf weinig gevoelig voor storende invloeden van buiten, maar kunnen wel storing produceren. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in:
- industriële toepassingen; hierbij gaat het om grote vermogenstoepassingen die vaak in speciale lokaties zijn geconcentreerd (industriegebieden),
- huishoudelijke toepassingen; van geringer vermogen, maar sterk gespreid en dikwijls dicht in de buurt van storingsgevoelige apparatuur of radio-ontvangers (woongebieden).

Sommige industriële toepassingen komen voor in de directe nabijheid van woongebieden (werkplaatsen, kantoorgebouwen, medische behandelruimten), zodat onderscheid tussen industriële en huishoudelijke toepassingen uit het oogpunt van reglementering tot problemen kan leiden.

Overige

Mengvormen van bovengenoemde deelgebieden komen veel voor. Zo heeft storing afkomstig van elektriciteitsnetten invloed op telecommunicatie- en elektronicasystemen voor zover deze uit het net worden gevoed, elektrische gebruikers hebben vaak enige elektronica ingebouwd voor besturingsdoeleinden en typische telecommunicatie- en elektronicasystemen bevatten dikwijls motoren en verwarmingsmiddelen voor ondersteunende functies.

STORINGSASPECTEN

Enkele van de meest belangrijke aspecten van EMC worden hierna genoemd.

Wederzijdse beïnvloeding



stoorpotentie koppeldemping storings(on)gevoeligheid

figuur 1

Elk EMC-geval is terug te brengen tot de grondvorm van figuur 1: een stoorbron die via een koppelmedium een ongewenst signaal veroorzaakt bij de gestoorde.

In het eindresultaat telt elk van de drie aspecten stoorpotentie, koppeldemping en storings(on)gevoeligheid in evenredige mate mee. Het is daarom in de praktijk van belang een afgewogen verdeling van de maatregelen voor EMC na te streven. Er moeten evenzeer eisen worden gesteld aan de storingsongevoeligheid (immunity) van de gestoorde als aan de stoorpotentie van de stoorbron, waarbij ook de koppeldemping in beschouwing moet worden genomen.

Helaas is een optimale verdeling niet altijd uitvoerbaar. In sommige gevallen is de stoorpotentie om physische of economische redenen aan een ondergrens gebonden. Zo kunnen hoogfrequent verwarmingsapparaten vaak niet voldoende worden afgeschermd wegens de toegankelijkheid voor grote werkstukken. In andere gevallen is koppeldemping of immuniteit aan grenzen gebonden.

Een ander probleem is de diversiteit in stoorbronnen die elk op zich een andersoortige invloed op de gestoorde kunnen uitoefenen. In dat geval moet de immuniteit voor elk van de verschillende situaties voldoende zijn.

Stoorpotentie

De stoorpotentie van een bron wordt uiteraard bepaald door het niveau van het stoorsignaal dat zich manifesteert als een spanning, een stroom of een veld.

Daarnaast zijn de signaalvorm en de bijbehorende bandbreedte van groot belang. Men kan onderscheid maken in smalbandige en breedbandige stoorbronnen, maar ook in gestoorden, waarbij de gevoeligheid in een smalle band geldt (bijv. radioverbindingen) of die over een brede band gevoelig zijn (bijv. digitale schakelingen).

Brede band stoorders hebben in het algemeen een laag stoorniveau, maar bij smalle band stoorders kunnen hoge stoorniveaus voorkomen (zenders, apparatuur voor industriële, wetenschappelijke of medische toepassingen, de z.g. ISM-apparatuur).

De toelaatbare stoorpotentie wordt vaak vastgelegd in storingslimieten, bij breedbandige storing wordt het niveau bepaald in een gestandaardiseerde bandbreedte (CISPR) of uitgedrukt in een niveauwaarde per Hz bandbreedte.

Storings(on)gevoeligheid

De gevoeligheid (susceptibility) of diens reciprokewaarde de ongevoeligheid (immunity) voor storingen wordt bepaald door verschillende factoren:

Reeds eerder is het medium genoemd, een radioverbinding met "open" antenne is gevoeliger dan een draadgebonden systeem.

Van belang is ook het gebruikte overdrachtssysteem, digitaal of analoog. Dit gedraagt zich voor storende signalen verschillend, een analoog signaal ondergaat een degradatie die evenredig toeneemt met het stoorniveau en geleidelijk overgaat van juist waarneembaar naar ontoelaatbaar, bij digitale signalen verloopt de degradatie bij toenemend stoorniveau veel meer abrupt.

De inkoppeling van stoorsignalen kan plaatsvinden via verschillende wegen, in de vorm van een omgevingsveld dat spanningen of stromen in gevoelige circuits induceert, via koppeling over het net, via geïnduceerde spanningen of stromen in aangesloten kabels.

De toegepaste technologie speelt hier tevens een belangrijke rol daar deze de gewenste signaalniveaus bepaalt. Technologieën met hoge signaalniveaus (klassieke buisschakelingen) zijn minder gevoelig voor stoorsignalen dan systemen werkend met lage niveaus (integrated circuits).

Van groot belang is tenslotte de constructie en de lay-out van schakelingen, waarbij een juiste wijze van aarding en afscherming en een reductie van de lengte en het oppervlak van verbindingscircuits de ongevoeligheid voor uitwendige velden en van ingekoppelde stromen en spanningen sterk kan verbeteren. In dit opzicht zijn de moderne geïntegreerde schakelingen juist weer gunstig vergeleken met de klassieke circuits, die veel grotere afmetingen bezitten. Een weldoordachte lay-out van een schakeling kan de immuniteit enkele tientallen dB verbeteren ten opzichte van een zelfde schakeling in een ongunstige uitvoering.

Er moet worden opgemerkt dat het meten van de immuniteit in het algemeen gecompliceerder is dan het meten van de stoorpotentie, daar een nauwkeurig gedefinieerde meetopstelling nodig is om de invloed van verschillende inkoppelwegen te kunnen overzien.

Koppeling

De koppeling tussen stoorbron en gestoorde kan op de volgende wijzen plaatsvinden:

- Conductief, meestal via gemeenschappelijke (aard-)impedanties (common mode koppeling). Een andere vorm van conductieve koppeling is de koppeling van stoorsignalen via het elektriciteitsnet.
- Inductief, door de magnetische velden van trafo's of lusvormige, laagohmige circuits.
- Capacitief door naburige spanningvoerende geleiders in hoogohmige circuits.
- Stralingskoppeling door uitgestraalde elektromagnetische velden die zowel in laagohmige als hoogohmige circuits signalen kunnen induceren.

Van de drie elementen: stoorbron, koppelweg en gestoorde is de koppelweg in de praktijk de meest variabele, daar de situatie van geval tot geval verschilt, zodat met een grote statistische spreiding moet worden gerekend.

Systeemeigen/vreemde storing

Het nemen van maatregelen op het gebied van EMC in gevallen van storing afkomstig van gelijksoortige systemen, blijkt in de praktijk het meest eenvoudig, omdat daarvoor in het algemeen voldoende expertise aanwezig is.

Voorbeelden van systeemeigen storingen zijn onder meer de invloed van de ene computer op de andere, de overspraak in kabels tussen nabijgelegen aderparen, de storing in een radiokanaal door andere zenders, hetzij in hetzelfde kanaal (cochannel interference), hetzij in een naastliggend kanaal (adjacent channel interference) of zelfs in een aangrenzende frequentieband (bijv. storing van FM-zenders in de aangrenzende band voor luchtvaartcommunicatie).

Moeilijker ligt het bij systeemvreemde storing, waarbij de stoorsignalen afkomstig zijn van anderswerkende systemen. Voorbeelden hiervan zijn de transients van de netspanning op computers en elektronische apparaten, de instraling van hoogfrequente velden van zenders in audio-apparaten, de invloed van de elektromagnetische puls (EMP) op elektronische en communicatiesystemen en de diverse soorten storing die radioverbindingen kunnen beïnvloeden.

Het is voor de systeemontwerper vaak moeilijk een goed overzicht te hebben van de storende signalen die van andersoortige bronnen afkomstig zijn.

Frequentiegebied

Brede band storing wordt veroorzaakt door impulsvormige signalen (thyristoren in netspanningsregelaars, digitale signalen met lage herhalingsfrequentie), door ruisvormige signalen (gasontladingsbuizen, corona) en door quasi-impulsvormige signalen (ruisvormige signalen in korte perioden of bursts veroorzaakt door schakelfuncties, collectormotoren, ontstekingsinrichtingen).

Het stoorspectrum is meestal vrij gelijkmatig verdeeld over het frequentiegebied met een geleidelijke afname naar hogere frequenties. Boven 300 MHz is de invloed van dit soort storing sterk afgenomen en boven 1000 MHz verwaarloosbaar.

Brede band storing komt veelvuldig voor op de aansluitingen van het elektriciteitsnet, de demping van dit net neemt bij hogere frequenties sterk toe, zodat men in het algemeen boven 30 MHz geen rekening meer houdt met storing die via het net wordt getransporteerd.

Smalle band signalen worden opgewekt door oscillatoren in elektronische apparatuur (laag vermogen), door ISM-apparatuur (middelgrote tot grote vermogens) en door zenders (middelgrote tot zeer grote vermogens).

Vaak zijn de signalen gemoduleerd met de netfrequentie (ISM) of met informatie (zenders).

Computersignalen worden als smalle band signalen gekenmerkt wanneer de grond(klok)frequentie zo hoog is dat de harmonischen door een selectief meetinstrument als afzonderlijke spectraallijnen worden verwerkt.

Smalle band signalen kunnen per definitie in het gehele in gebruik zijnde radiospectrum voorkomen.

TECHNISCHE MAATREGELEN VOOR HET VERKRIJGEN VAN EMC

Overeenkomstig het principeschema van figuur 1 kunnen achtereenvolgens maatregelen worden genomen in:

Reductie van het stoorniveau

Maatregelen in de stoorbron zelf zijn: keuze van een bron met een laag stoorniveau, bijv. door reductie van het signaalniveau (oscillatoren), keuze van een ander type (asynchrone motoren in plaats van collectormotoren), stroomloos schakelen.

Ligt het stoorniveau van de bron vast, dan kunnen aanvullende ontstoringsmaatregelen aan de uitgang van de bron worden genomen in de vorm van filteren (frequentieselectieve demping), absorptie (frequentie-onafhankelijke demping) en afscherming van de bron.

Reductie van de koppeling

De koppeldemping kan worden verhoogd door verschillende maatregelen zoals het veranderen van lokatie (vergroting van de afstand), gebruik maken van natuurlijke afscherming (radiopaden) of kunstmatige afscherming (afgeschermde kabels), toepassen van goed gebalanceerde en getwiste geleiders, netscheidingstransformatoren, e.d.

Verhoging van de immuniteit

De te nemen maatregelen zijn complementair aan die van de storingsbron. Genoemd worden: verhoging van het gewenste signaalniveau, afschermen, filteren en dempen van ongewenste signalen.

Een andere methode om de immuniteit te verbeteren, is het gebruik van speciale modulatiemethoden en/of codering.

REGLEMENTAIRE MAATREGELEN VOOR HET VERKRIJGEN VAN EMC

Verschillende internationale en nationale organisaties en instanties houden zich bezig met het voorschrijven van maatregelen op EMC-gebied. De belangrijkste internationale organisaties zijn:

IEC (International Electrotechnical Commission)

waarin industrieën, overheden en andere belanghebbenden samenwerken. Van de TC's (Technical Committees) voor de verschillende deelgebieden zijn in het bijzonder van belang voor EMC:

TC 77 - Electro Magnetic Compatibility between electrical equipment including networks: speciaal op het gebied van elektriciteitsvoorziening en elektrische gebruikers.

CISPR - Comité Spécial des Perturbations Radioélectriques: speciaal op het gebied van radiostoringen; geeft meetmethoden en limieten voor stoorniveaus van ISM-apparatuur, dataverwerkende systemen, hoogspanningsinstallaties, motorvoertuigen, omroepontvangers, huishoudelijke apparaten en fluorescentieverlichting en voor de immuniteit van ontvangers.

Sommige TC's voor speciale toepassingsgebieden doen aanvullende aanbevelingen op het gebied van EMC voor hun specifieke werkgebied.

ITU (International Telecommunication Union)

Algemene beschermingsmaatregelen op overheidsniveau op het gebied van telecommunicatie.

De technische informatie wordt aangedragen door een tweetal Comité's Consultatif International (CCI) voor respectievelijk telefonie en telegrafie (CCITT) en voor radiodiensten (CCIR).

URSI (Union Radio Scientifique Internationale)

Wetenschappelijk onderzoek naar diverse aspecten van radiotoepassingen, o.a. ruis en storingen.

EEG

Deze vaardigt Richtlijnen uit voor het harmoniseren van de nationale wetgevingen van de lidstaten o.a. op radiostoringsgebied. Zo zijn er momenteel Richtlijnen voor storing veroorzaakt door motorvoertuigen, door huishoudelijke apparaten en door fluorescentieverlichting, gebaseerd op de aanbevelingen van CISPR.

Richtlijnen voor ISM-apparatuur en voor omroepontvangers zijn reeds enkele jaren in discussie, maar nog steeds niet gereedgekomen.

Nationaal is de Radiostoringswetgeving als deel van de Telegraaf en Telefoonwet de belangrijkste regeling op EMC-gebied. Deze wetgeving regelt de eisen aan stoorbronnen op grond van de bestaande EEG-Richtlijnen.

Naast bovengenoemde regelingen voor civiele toepassingen, zijn er uitvoerige militaire specificaties (MILSPECS) voor EMC-toepassingen in de militaire sfeer. Tenslotte zijn er nog diverse individuele regelingen en specificaties van lagere orde die betrekking hebben op bepaalde deelgebieden van het totale EMC-gebied.

BESLUIT

EMC omvat een zeer uitgebreid werkterrein waarin zich vele en veelsoortige problemen kunnen voordoen. De storingsproblemen zijn in de praktijk vaak complex wegens de vele aspecten die in het geding zijn. Meestal wordt een oplossing voor deze problemen gezocht en gevonden in een sterk op het geval gerichte, experimenteel uitgevoerde behandeling.

Zonder fundamentele kennis, maar met een redelijke praktische ervaring kunnen vele voorkomende storingsgevallen tijdelijk of definitef verholpen worden. Een dergelijke aanpak kan op den duur echter slechts op beperkte schaal succes opleveren.

Voor een meer elementaire benadering, die vooral in de ontwikkelfase van systemen, apparaten en onderdelen nodig is, wordt een grondiger kennis en inzicht verlangd. Helaas is tot nu toe in technische opleidingen van alle niveaus nauwelijks of in het geheel geen aandacht aan EMC geschonken.

Voor een goed functioneren van de zich nog steeds sterk uitbreidende samenleving van elektrische systemen en gebruikers is het zeer gewenst dat aan dit opleidingsaspect in de naaste toekomst aandacht wordt besteed.

Voordracht gehouden tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 310), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie, op 4 november 1982 in de Afdeling Elektrotechniek van THD.

EMC EN INDUSTRIE

J.J. Goedbloed

Philips Research Laboratories, P.O.Box 80.000, 5600 JA Eindhoven, The Netherlands

An introduction to Electro-Magnetic Compatibility (EMC) is presented. Firstly, some general problems are discussed, related to EMC and Industry, like emission- and immunity-levels, EMC-margins, acceptance-probability and measuring methods. Secondly some technical aspects of EMC are given, such as the description of a practical interference problem together with some theoretical background (common-mode coupling, cable transfer-impedance) needed to solve that problem. Finally, attention is paid to the susceptibility of semiconductor devices for Radio-Frequency Interference-signals, together with immunity measures which already can be taken in the design-stage of a circuit.

1. INLEIDING

Deze verhandeling over Elektro-Magnetische Compabiliteit (EMC), ofwel de verenigbaarheid van elektrische en elektronische systemen, zal uit twee hoofddelen bestaan. In het eerste deel ligt het accent op EMC-aspecten, die de industrie tegenkomt bij het op de markt brengen van haar elektrische en elektronische produkten, het tweede deel is meer technisch van aard. Daarin wordt aan de hand van enkele voorbeelden aangetoond dat het verkrijgen van EMC niet – zoals nog veel gedacht wordt – het privilege is van een of andere (wellicht begaafde) magiër, maar het gevolg is van een weldoordacht ontwerp. Geconstateerd moet worden dat het dringend noodzakelijk is dat op alle niveaus in het elektronica en elektrotechniek onderwijs, EMC-zaken worden opgenomen.

Een verhandeling over EMC zou niet nodig zijn als er geen interferentie-problemen waren, vandaar dat daar in par. 2 mee wordt begonnen. In par. 3 wordt een definitie van EMC besproken, terwijl in par. 4 enkele wensen van de industrie t.a.v. het opstellen van EMC-specificaties samengevat worden. Ter illustratie volgt in par. 5 een voorbeeld van een EMC-probleem, dat voornamelijk ontstaan was door onjuist gebruik van signaal-kabels. In par. 6 zullen enkele theoretische achtergronden worden gegeven die het oplossen van dat probleem mogelijk maken. Tenslotte schenkt par. 7 d.m.v. een voorbeeld over de stoorgevoeligheid van haldfgeleiderschakelingen, aandacht aan de noodzaak EMC-zaken reeds in de ontwerpfase van systemen mee te nemen.

2. HET EMI-PROBLEEM

Een Elektromagnetisch Interferentieprobleem (EMI-probleem), dus een stoorprobleem doordat systemen niet elektromagnetisch verenigbaar (niet EMC) zijn, bestaat minimaal uit drie delen: een stoorbron, een gestoord systeem en een koppelweg daar tussen, zie Fig. 1. Natuurlijk kan in de praktijk het probleem uitgebreider zijn: een aantal stoorbronnen die op één enkel systeem inwerken, één enkele stoorbron die een aantal systemen stoort, etc. Bovendien is een veelheid van koppelwegen mogelijk.

Een triviale conclusie is dan: het probleem is opgelost als één van de drie deelstukken er niet is. Dit suggereert dat men zich op één enkel deelstuk zou kunnen concentreren. Meestal levert deze aanpak alleen in bijzondere gevallen een oplossing. In het algemeen moet, zeker vanwege kosten- en aansprakelijkheids-aspecten, een EMI-probleem steeds op alle drie de fronten worden aangepakt. Dit laatste niet alleen in technische zin, maar ook wanneer het gaat om het opstellen van (wettelijke) voorschriften.

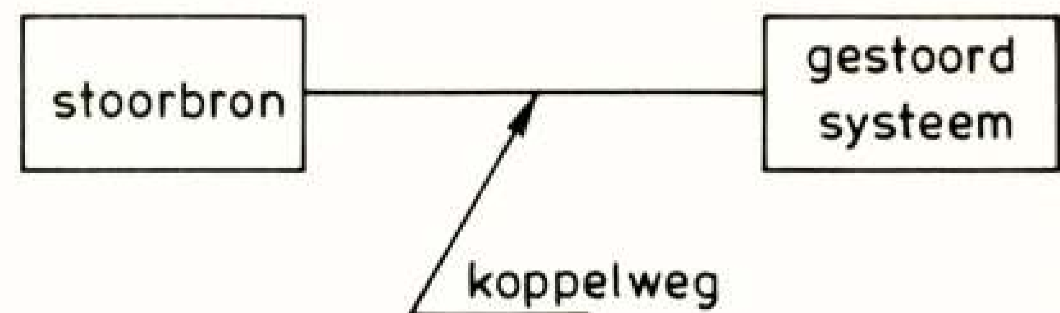


Fig. 1. Het EMI-probleem

Om tot EMC te komen, dus tot een „ongestoord leven", moeten eisen gesteld worden aan de grootte van stoorbronnen, de immuniteit van te storen systemen en de invloed van koppelwegen.

De grootte van de stoorbron is niet altijd beinvloedbaar. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer de stoorbron een zender is (omroep, oproep, radioamateur, etc.). Een voorbeeldje: Een aantal jaren geleden werd in IJselstein de wolwas kookwas wanneer de korte-golf-zenders in de lucht kwamen en men de was deed met een wasmachine met elektronische temperatuurregeling. Men kan dan moeilijk eisen dat de Wereldomroep haar uitzendingen staakt tot de was aan de lijn hangt. Dit probleem kon worden opgelost door de storingsgevoeligheid van de wasmachine te verminderen.

Het voorbeeld geeft ook een probleemgebied aan, n.l. de introductie van elektronica in omgevingen, die van „huis uit" niet-elektronisch georiënteerd zijn; hier de wasmachinefabriek. De in de elektrotechnische omgeving werkende ontwerper van de genoemde temperatuurregeling had niet het flauwste vermoeden dat het zenderveld dat ontoelaatbare effect kon veroorzaken. Had hij het wel gehad, dan was zeker dat ene condensatortje aangebracht, nodig om het probleem te voorkomen.

De storingsgevoeligheid van het te storen system is, in zekere zin, een onbekende grootheid, omdat men de vorm van alle voorkomende stoorsignalen van te voren niet kent. Men kan dus hoogstens testen met een (af te spreken) aantal stoorsignaal-vormen.

Tenslotte de koppelweg. Eigenlijk is deze grootheid alleen bij professionele systemen in de hand te houden. Alleen daar mag men verwachten dat de EMC-voorschriften (bijvoorbeeld die met betrekking tot

kabel-keuze, kabel-layout en afmontage van de kabel) op een verantwoorde wijze worden uitgevoerd. Even terzijde: de afmontage van kabels wordt in een bedrijf vaak aan de monteurs overgelaten, die wel iets geleerd hebben over de afmontage van sterkstroom-kabels doch bij signaal- en data-kabels niet méér weten dan „vast is vast". Dat dan vast en zeker een storingsgevoelig systeem ontstaat (zie par. 6), is hen niet kwalijk te nemen.

3. DEFINITIE EMC

Een voor veel toepassingen bruikbare definitie van EMC is:

> EMC is het vermogen van systemen om, met een afgesproken veiligheidsmarge, in een vooraf gegeven elektro-magnetisch milieu te kunnen functioneren, zonder degradatie als gevolg van interferenties.

De aspecten „zonder degradatie" en „afgesproken veiligheidsmarge" zullen nu wat verder uitgewerkt worden.

3.1. Zonder degradatie

Dit aspect heeft twee facetten, n.l.:

1) limitering van de emissie van stoorsignalen: het systeem mag het gegeven EM-milieu niet merkbaar beinvloeden, en
2) limitering van de stoorgevoeligheid: het systeem mag als gevolg van dat gegeven EM-milieu niet degraderen.

In beide gevallen hebben we te maken met wettelijke limieten, bijv. gesteld door de EEG [1] of de FCC [2], en/of wenselijke eisen, bijv. gesteld door de klant of de specifieke toepassing van het systeem. Referentie [1] geeft bijvoorbeeld limieten voor de stoorsignalen die in het frequentiegebied 150 kHz – 30 MHz in het 220V-net geinjecteerd mogen worden. Fig. 2 laat zien hoe aan een Philishave enkele condensatoren en spoelen moeten worden toegevoegd om door hun gezamenlijke filterwerking aan die limieten te kunnen voldoen. Opvallend is dat hier een over het apparaat gedistribueerd filter is toegepast, en niet een compact filter bij de net-aansluiting. Dit komt omdat dit laatste filter bij gebruik van de Philishave overbrugd wordt door de capacitieve koppeling met onze hand en de rest van het lichaam, en daardoor niet effectief kan zijn. Bij het testen is daarom het gebruik van een z.g. kunsthand voorgeschreven [1].



Fig. 2. Philishave met onstoormiddelen, aangeduid door pijltjes.

Naast wettelijke eisen zijn er ook de z.g. wenselijke eisen, streefwaarden die door de industrie zelf gesteld worden om servicekosten en „zelfgegenereerde" anti-reclame voor het produkt of de merknaam te voorkomen. Deze zijn vaak zeer veel strenger dan wettelijke eisen [3] of internationale aanbevelingen [4], in het bijzonder wanneer het gaat om toepassingen van digitale elektronica in consumenten apparaten. Hiervan twee voorbeelden.

a) Voor een goede AM-ontvangst met een ferroreceptor-antenne, is een veldsterkte van minimaal 1 mV/m vereist, met een minimale signaal/interferentie-verhouding van 26 dB. Dit betekent dat ter plaatse van de ferroreceptor de sterkte van het stoor-signaal slechts 50 μV/m mag zijn. De huidige internationale aanbevelingen houden op dit moment 50 μV/m op 30 m afstand aan. Er zullen weinig huiskamers zijn waarin de afstand tussen het digitale apparaat (waarin de scherpe klokpulsen of de display-elektronica de grootste stoorbronnen zijn) en de AM-radio minimaal 30 meter is.

b) In [1] worden limieten gesteld aan de grootte van de storing die ontstaat bij het schakelen van huishoudelijke apparaten (klikstoring). In deze wettelijke limieten, ter bescherming van radioverbindingen waaronder radio- en TV-ontvangst, is een subjectieve beoordeling van de storing door ons oor of oog verwerkt, terwijl deze emissie-limieten milder worden naarmate het aantal klikken per tijdseenheid afneemt. Als gevolg hiervan biedt het voldoen aan de limieten geen enkele garantie voor het ongestoord functioneren van een digitaal apparaat in de buurt van dat huishoudelijk apparaat. Fig. 3 toont een aantal resultaten van metingen van impulsstoringen (transienten) op het 220V-net, overgenomen uit [5]. Weergegeven is de gemeten steilheid van transienten als functie van hun maximale amplitude. Voor verdere details zie [5]. Een „top-scorer" in deze grafiek is een koffiemolen (met serie-motor) die dicht bij het aansluitpunt transienten met een U_{max} = 1000 V kan genereren. U ziet het al gebeuren: de secretaresse zet koffie en de word-processor gaat de fout in.

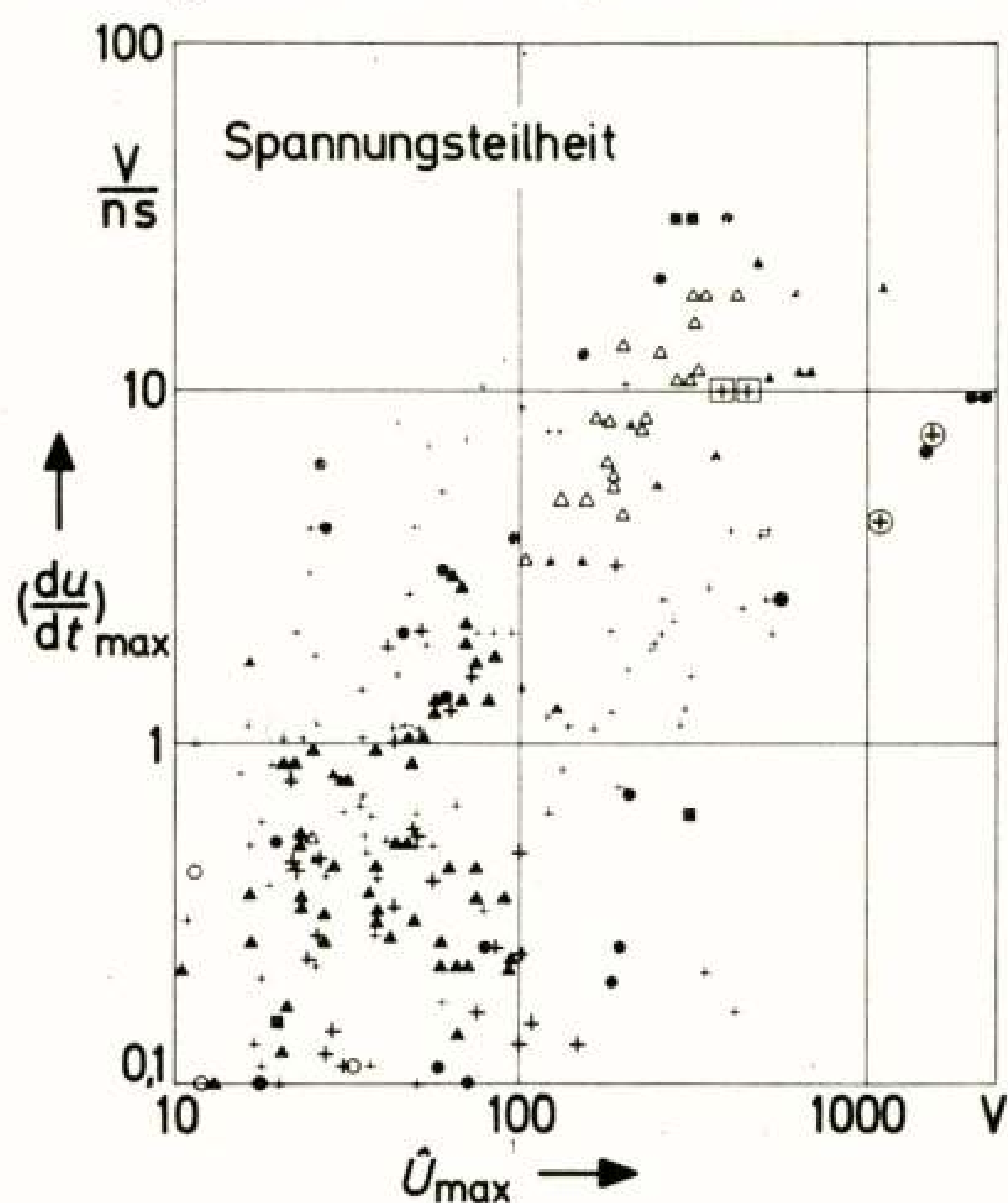


Fig. 3. Grootte van de steilheid als functie van de overspanning van transienten volgens [5].

3.2. Afgesproken veiligheidsmarge

Het is een moeilijke zaak het in de praktijk voorkomende EM-milieu

goed te specificeren (een meting geeft een moment-opname op die ene meetplaats). Bovendien zijn de testprocedures gebaseerd op gemiddelde parameters. Daarom moet in de praktijk een zekere veiligheids- of EMC-marge aangehouden worden, zie Fig. 4, [6]. Daarnaast is er nog de marge, die de fabrikant aan moet houden bij het voldoen aan de gestelde limieten. Fig. 4 geeft een voorbeeld van het niveau van een stoorgrootheid als functie van de frequentie. Er is daarbij verondersteld dat het hier gaat om één enkele stoorbron en één enkel storingsgevoelig apparaat. Aangegeven zijn a) de limieten voor emissie en gevoeligheid die tussen fabrikant en gebruiker (kunnen) zijn overeengekomen, b) de werkelijke waarden van emissie en stoorgevoeligheid, die volgens een afgesproken methode zijn bepaald (zie hiervoor ook par. 4), en c) de hierboven genoemde marges.

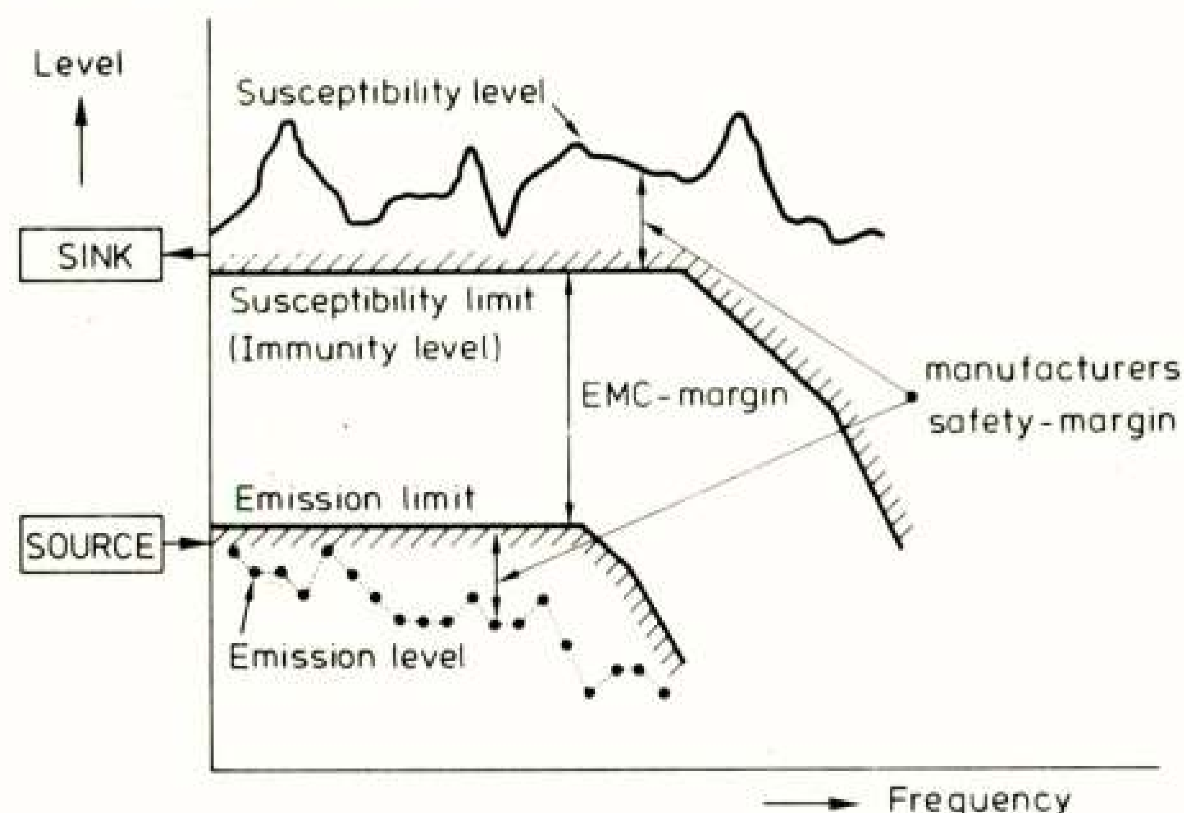


Fig. 4. Overzicht EMC limieten en marges.

Enkele punten die een rol spelen bij het bepalen van de grootte van de marges zijn:

a) De toelaatbaarheid van een storing. Is de veiligheid in het geding, dan zal vaak een grote EMC-marge nodig zijn. In de professionele sfeer is het al voorgekomen dat een onvoldoende marge er toe bijdroeg dat een robot een in de buurt staande persoon lichamelijk letsel toebracht, als gevolg van een transient op het 220V-net. Bij consumenten-artikelen moeten de marges soms ook heel groot zijn, zeker als aansprakelijkheid aan de orde kan komen. Denk bijvoorbeeld aan de microprocessor in een wasmachine die, indien gestoord, de watertoevoer permanent open laat staan. De twee voorbeelden laten zien dat naast aandacht voor de EMC-marge, er ook aandacht moet zijn voor het „fail-safe" ontwerpen van apparatuur.

b) De (initiële) kosten om een gestelde limiet te realiseren, waartoe ook behoren: de testkosten om de limieten te verifieren en de in de praktijk optredende spreiding der werkelijke waarden. Bij dit alles speelt de grootte van de produktie-series een belangrijke rol. Bij de wenselijke eisen (door de fabrikant zelf aangehouden) zijn ook die kosten belangrijk, die gemaakt moeten worden om een (te schatten) aantal klachten achteraf op te lossen. Stel een serie-grootte van 100.000 stuks en initiële kosten om een wenselijke eis te realiseren f. 2,50 per apparaat, dan vraagt dit een bedrag van f. 250.000,–. Voor dit bedrag kan de service-afdeling echter een aardig aantal klachten gratis behandelen, dus zal naar een evenwicht gezocht moeten worden. Bij het zoeken naar dit evenwicht moet voorts rekening gehouden worden met het niet-direct te kwantificeren goodwill-verlies, dat men als gevolg van het klachtenpatroon kan lijden.

De kosten van het testen zijn zeker niet te verwaarlozen. Vooral de wettelijk voorgeschreven stoor-emissie-metingen zijn vaak zeer tijdrovend, vereisen speciale en vaak dure apparatuur en meetplaatsen, en lenen zich – strikt genomen – niet voor automatisering.

c) De acceptatie-kans bij een steekproef. In het geval van massaproduktie moeten apparaten, die op de markt gebracht worden, zodanig aan de wettelijk voorgeschreven emissie-limieten voldoen dat tevens voldaan is aan de z.g. 80% – 80% steekproef-eis. Dit omdat bij massaproduktie niet elk apparaat getest kan worden. De eis houdt in dat bij een steekproef moet blijken dat 80% van de geproduceerde apparaten met een waarschijnlijkheid van 80% aan de gestelde limiet voldoen.

Deze eis ter bescherming van de consument is voor de fabrikant erg streng, wil die fabrikant een zekere acceptatie-kans hebben. Voor details zij verwezen naar [7] en [8]. We volstaan hier met een getallenvoorbeeld.

Stel dat bij een zekere frequentie (n.b. de limieten gelden voor hele frequentiegebieden, bijv. 150 kHz – 30 MHz) de emissielimiet L voor een zekere stoorgrootheid (spanning, veldsterkte, etc.) 60 dB boven een zekere referentie-waarde ligt, en dat 5 apparaten bij die frequentie gecontroleerd worden.

Stel er wordt gemeten:

Apparaat nr.	1	2	3	4	5
meetwaarde (dB)	59	51	56	54	55

De eerste conclusie is: alle meetwaarden liggen beneden het toegestane maximum van 60 dB, wat goed is. De steekproef schrijft echter voor dat voldaan moet zijn aan

$$x_n + k_n \cdot s_n \leqslant L \,, \tag{1}$$

waarbij x_n het gemiddelde is van de n (in dB uitgedrukte) meetwaarden, s_n de bijbehorende standaard deviatie (in dB), en k_n een door de statistiek voorgeschreven constante die a) van n afhangt, b) bepaald wordt door de aangenomen (!) statistische verdeling der meetwaarden van alle apparaten uit de massa-produktie en c) de 80% – 80% regel.

Passen we vgl. (1) toe op de 5 meetwaarden, dan volgt x_5 = 55 dB, s_5 = 2,9 dB, terwijl gegeven is k_5 = 1,52, zie [1,8], zodat

$$x_5 + k_5 \cdot s_5 = 59{,}4 < L = 60 \,. \tag{2}$$

Met dit resultaat voldoet men aan de eis. Stel echter dat de steekproefnemende instantie slechts apparaten 1 t/m 3 getest had, in dat geval volgt:

$$x_3 + k_3 \cdot s_3 = 55{,}3 + 2{,}04 \times 4{,}0 = 63{,}5 > L = 60 \,, \tag{3}$$

zodat niet aan de eis voldaan is! Merk op dat $k_3 > k_5$; dit komt omdat (statistisch gezien) 3 apparaten een minder betrouwbaar resultaat opleveren dan 5 apparaten.

Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat de fabrikant gemiddeld veel meer moet ontstoren dan de limiet aangeeft, teneinde een voldoende acceptatiekans te hebben. Om een 95% acceptatiekans te verifiëren zou de fabrikant in vgl. (2) k_5 = 2,6 moeten toepassen, in plaats van k_5 = 1,52, zie [8].

4. ENKELE WENSEN VAN DE INDUSTRIE

Ter afsluiting van het eerste deel volgen hier enkele wensen van de industrie t.a.v. het stellen van EMC-eisen door derden.

a) De meetmethoden en de daarbij behorende limiet moeten zodanig opgesteld zijn dat deze het in de praktijk optredende EMI-probleem dekken. Dit lijkt vanzelfsprekend, doch is niet altijd het geval. Voorbeeld: Duitsland eist dat een TV-toestel getest wordt op immuniteit voor instraling van ongewenste signalen op de frequentie waarop het toestel staat afgestemd, om te voorkomen dat er „geestbeelden" ontstaan, als een op een centraal-antenne systeem aangesloten toestel via „ongeoorloofde" wegen het zender-signaal precies op de afstemfrequentie uit de ether ontvangt.

Om dit effect te onderzoeken is er o.m. een gestandaardiseerde Britse meetmethode [9], waarbij het TV-toestel in een voor de test opgewekt EM-veld wordt geplaatst. Door middel van ronddraaien van het toestel en het varieren van de hoogte van de zendantenne wordt dan de minmale, hierboven omschreven, immuniteit vastgesteld. Deze Britse methode sluit dus goed bij het werkelijke probleem aan. In Duitsland is men echter zeer huiverig voor het gebruik van zenders bij EMC-tests, als dat niet in een kooi van Faraday plaatsvindt. Daarom heeft men daar een methode ontworpen [10], die gebruik maakt van het reciprociteitstheorema: kan er veel ongewenste straling in, dan komt er ook veel ongewenste straling uit. Het theorema mag hier echter niet worden toegepast, omdat een TV-toestel zich in deze natuurlijk niet-reciprook gedraagt. De voor zich sprekende gevolgen zijn geschetst in fig. 5, [11]. De getrokken lijnen geven de immuniteit, als functie van de frequentie waarop het toestel is afgestemd, volgens de Britse methode en de gestreepte lijnen de resultaten volgens de Duitse methode.

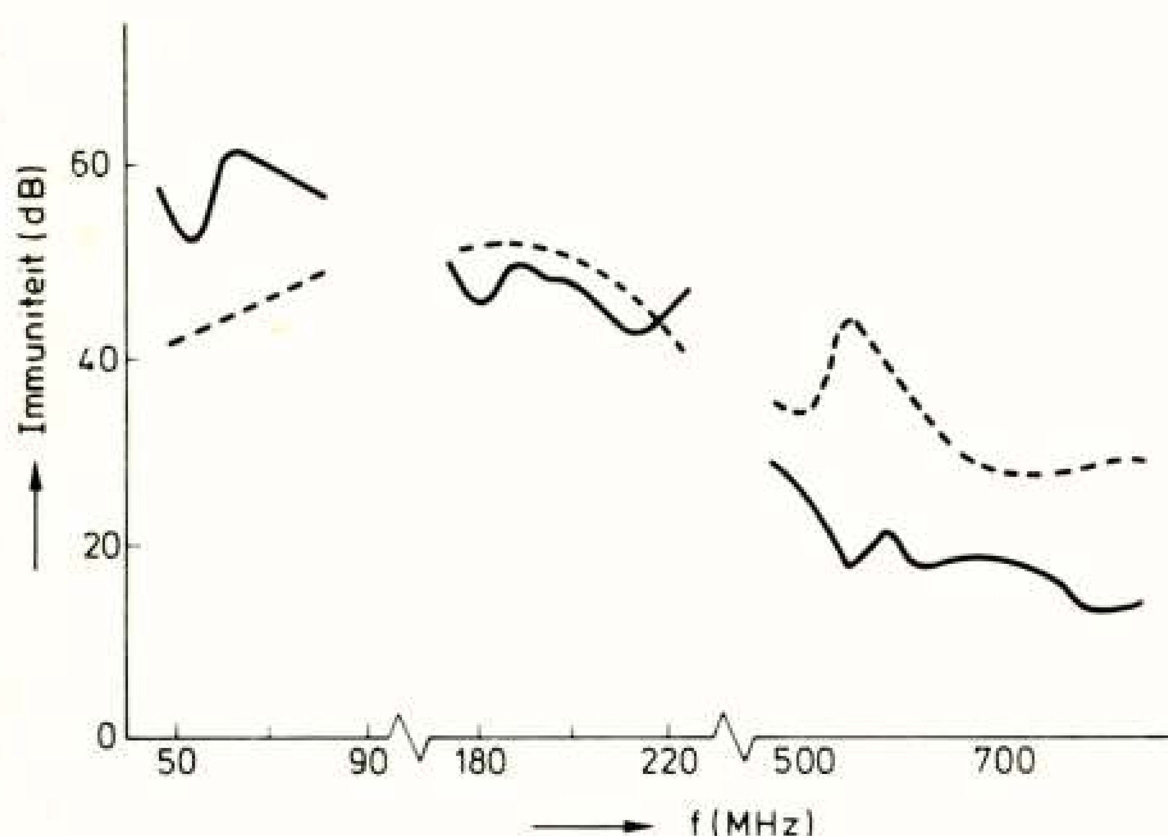


Fig. 5. Immuniteit van een TV-toestel voor in-band instraling.
——— Britse methode [9], – – – Duitse methode [10].

b) De meetmethode en de beoordelingscriteria moeten ondubbelzinnig zijn. Een fabrikant moet er zeker van kunnen zijn dat zijn resultaten er bij de controlerende instanties weer uitkomen, „waar ook ter wereld". Bovendien moet, ter vermijding van hoge kosten achteraf, de ontwerper van een systeem duidelijk weten waar hij aan toe is. Een voorbeeld hoe het niet moet, zijn de eisen die de EEG stelt aan apparaten waarvan het gebruik geschiedt onder toezicht van de landelijke diensten voor het IJkwezen [12]. In dit geval worden wel eisen gesteld, doch men zwijgt in alle talen over zowel meetmethoden als beoordelingscriteria.

c) Bij het vaststellen van limieten moet rekening gehouden worden met de, reeds eerder besproken, veiligheidsmarges die een fabrikant aan moet houden in het geval van steekproef-controle bij massa-produkties. Een voorbeeld: Stel dat in een centraal antenne-systeem het signaalniveau gegarandeerd wordt op x dB(μV), dat geëist wordt dat de signaal/interferentie-verhouding minimaal y dB is en dat gegeven is dat de interferentie-signalen afkomstig uit een naburig TV-apparaat (bijv. de signalen afkomstig van de meng-oscillator) minimaal z dB gedempt worden door de werking van de antenne-aansluitdoos. Dan mag in de „worst-case" situatie het interferentiesignaal U_i maximaal $((x-y) + z)$ dB(μV) bedragen. Stel nu dat alle betrokkenen een veiligheidsfactor van 4 dB aanhouden: signaal-niveau gemiddeld $(x + 4)$ dB(μV), demping antennedoos gemiddeld $(z + 4)$ dB en het interferentiesignaal uit de TV gemiddeld $(U_i - 4)$ dB(μV). Dan wordt de gemiddelde signaal-interferentie verhouding $y_g = (x + 4) + (z + 4) + - (U_i - 4) = y + 12$ dB. Dus gemiddeld een 12 dB grotere veiligheidsfactor dan nodig. Dit geeft aan dat de limieten niet gelijk hoeven te zijn aan de „worst-case" waarden.

d) De gestelde eisen moeten realiseerbaar zijn, d.w.z. als gevolg van de gestelde eisen mogen de gewenste eigenschappen van het apparaat niet nadelig beinvloed worden. Indien dit laatste dreigt, moeten aan de overige delen van het EMI-probleem aanvullende eisen gesteld worden. Een voorbeeld van niet-realiseerbare eis is: De Duitse overheid stelt o.m. dat een audio-apparaat immuun moet zijn voor een zeker stoorsignaal aan te brengen op elke ingang voor rand-apparatuur [10]. Voldoen aan de eis in het geval van de (relatief hoog-impedante) ingang voor de magneto-dynamische pick-up kan alleen door maatregelen die leiden tot een degradatie van de frequentiekarakteristiek van dit pick-up systeem.

e) Voorschriften, in het bijzonder de wettelijke, zijn alleen acceptabel als er een goede controle is op de naleving daarvan. Het mag niet zo zijn dat een fabrikant, die zich aan de voorschriften houdt en daardoor meer kosten maakt, in een oneerlijke concurrentie-positie komt ten opzichte van de fabrikant die deze voorschriften aan zijn laars lapt.

f) De voorschriften dienen zo internationaal mogelijk te zijn of gemaakt te worden. Dit geldt zowel voor de limieten (eisen) als voor de bijbehorende meetmethoden. Verschillen tussen de diverse landen brengen voor exporterende industrieën steeds onnodige kosten met zich mee.

5. VOORBEELD VAN EEN EMC-PROBLEEM.

Na de algemene beschouwingen, die vooral betrekking hadden op produkten die op de markt gebracht worden, een voorbeeld dat aangeeft hoe men in een bedrijf tegen een EMC-probleem kan aanlopen en waaruit blijkt dat vaak een aantal aspecten tegelijk een rol spelen.

De klacht luidde als volgt: Herhaaldelijk op de dag gaan een 26-tal terminals, aangesloten op een locale data-processor die op zijn beurt weer aangesloten is op een centrale computer, volledig op „tilt". Hierbij gaat van alle 26 terminals de informatie verloren die nog niet aan de centrale computer was doorgegeven. Bovendien „beloont" de centrale

computer deze fout met het automatisch afkoppelen van de processor.

In fig. 6 zijn twee van de terminals, de data-processor en een aantal verdere zaken geschetst, die in het verhaal een rol spelen. Bij de oplossing van het probleem kwamen de volgende punten naar voren.

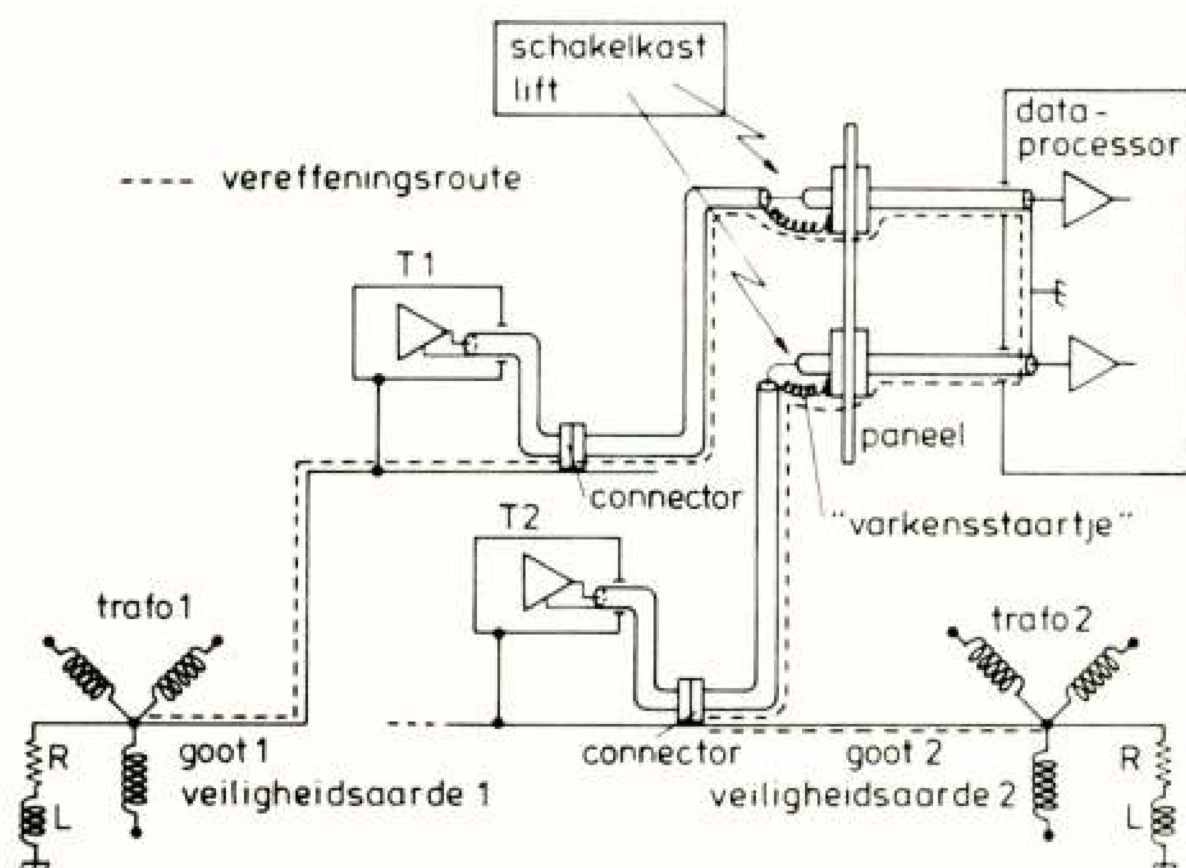


Fig. 6. Schets van een praktisch EMI-probleem, zie tekst.

a) De processor was dicht bij de schakelkast van een lift geplaatst en het schakelen van de lift was in een aantal gevallen te correleren met het fout gaan van het systeem. Het bleek dat men, om de plaatsing van de terminals flexibel te houden, de terminal-aansluitingen van de processor naar buiten gevoerd had, naar een paneeltje van isolatie-materiaal. Aan één zijde, zie Fig. 6, was daarbij de coaxmantel via het bekende „varkensstaartje" onder een klemverbinding afgemonteerd. Hierdoor kon de stoorstraling van de vonkende lift-schakelaars capacitief inkoppelen op de kern van de coax-kabel. Bovendien verslechterden deze varkensstaartjes de transfer-impedantie van de totale kabel, zie par. 6.

Remedie: juiste keuze van de connector zorgde ervoor dat de coaxmantel bij afmontage helemaal rondom dicht bleef.

b) Niet alle klachten waren weg zodat verder onderzoek nodig was. Het bleek dat wanneer alle kabels bij het paneeltje losgekoppeld waren, er nog steeds een galvanische verbinding bestond tussen de coax-kabels naar de diverse terminals. Dit mag niet, omdat de fabrikant er voor gezorgd had dat de pc-boards in de terminals zwevend waren, zie ook par. 6. Oorzaak: Verbindingspluggen voor verlengkabels, ook weer aangebracht om de flexibiliteit van het systeem te vergroten, maakten galvanisch contact met de kabelgoten (zie Fig. 6). Dit is hier vooral funest omdat het gebouw voor zijn energievoorziening gevoed wordt uit twee 10kV/380-220 V transformatoren, en er nu – via de kabelgoten en coax-kabels, tezamen met de uitwerking van allerlei veiligheidsvoorschriften – een galvanische verbinding ontstaan was tussen de sterpunten van deze trafo's, zie de gestreepte lijn in Fig. 6. Als dan een trafo stootsgewijs belast wordt, bijv. door het aanzetten van een motor in één van de fases, „springt" de potentiaal van het sterpunt van die trafo. Dit „springen" kan, omdat alleen bij 50 Hz de impedantie naar de aarde zo gering is (zeg < 0.5 Ohm). Bij stootbelasting komen hogere frequenties voor en is de zelfinductie van de aardverbindingen de impedantie-bepalende grootheid (vuistregel 1 μH per meter geleider). Deze kan hoog zijn, zodat het sterpunt springt en er een niet te verwaarlozen vereffeningsstroom via ons systeem naar het andere sterpunt kan lopen.

Deze stroom kan op twee manieren storing veroorzaken. Ten eerste: in de data-processor loopt deze stroom door aardsporen die ook door het gewenste signaal gebruikt worden. De stroom wordt dan in een stoorspanning (in serie met het gewenste signaal) omgezet via de (gemeenschappelijke) impedantie (1 nH/mm) van dat spoor, zie par. 6. Ten tweede: ook via de transfer-impedantie, zie eveneens par. 6, wordt de stroom door de coaxmantel omgezet in een serie-stoorsignaal.

Remedie: verbindingspluggen in de goten voorzien van een isolerende mantel.

c) In een aantal gevallen werd de data-processor nog gestoord door transienten op het net, hoewel een filter (achteraf) aangebracht was. Door onjuiste montage bleek dit filter niet de verwachte demping te geven: in- en uit-gaande kabels van het filter waren keurig in dezelfde kabelboom gebonden, zodat door overspraak het filter werd kortgesloten. Bovendien was de aarde van het filter met een aardkabel van ca. 0,5 m met het referentiepunt verbonden, zodat de condensatoren in dat filter een serie-zelfinductie kregen van ca. 0,5 μH.

d) Toen alle voorgaande punten in orde waren, kwam nog een onregelmatig optredende fout in de soft-ware naar voren. Vanwege de grote storingsgevoeligheid van het systeem was deze fout niet eerder ontdekt.

6. ENKELE ASPECTEN VAN COMMON-MODE STORING

Een deel van de problemen, die in par. 5 geschetst zijn, laten zich aan de hand van een eenvoudig model nader verklaren. Het nu volgende model is overigens ook in zeer veel andere situaties van toepassing.

In Fig. 7 is de situatie geschetst van twee systemen S_1 en S_2, die via een coax-kabel met elkaar communiceren. S_1 kan bijv. de terminal en S_2 de data-processor zijn uit par. 5. Vele andere situaties zijn denkbaar, zoals: S_1 een videorecorder met S_2 een TV-toestel. S_1 een wandconactdoos en S_2 een elektronisch kasregister. S_1 pc-board-1 met S_2 pc-board2, etc. Ook is het niet essentieel dat een coax-kabel gebruikt wordt; het kan elk type twee-aderige verbinding zijn.

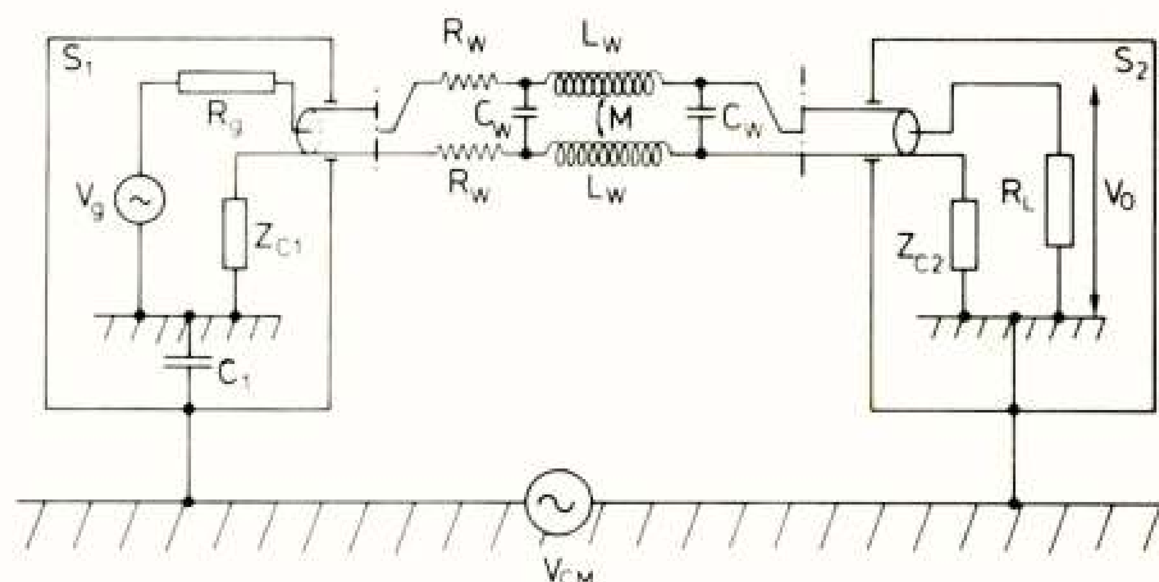


Fig. 7. Het 2-dozen model, zie tekst.

Voor het verkrijgen van inzicht is het voldoende S_1 te karakteriseren met een uitgangsweerstand R_g en S_2 met een ingangsweerstand R_L. Voorts zijn de impedanties van de aardverbindingen binnen het systeem (bijv. die van de printsporen) aangegeven met Z_{c1} en Z_{c2}. De systemen worden verondersteld zich in een metalen kast te bevinden, waarbij in dit voorbeeld de pc-boards van S_1 niet en die van S_2 wel galvanisch met de kast zijn verbonden, terwijl beide kasten verbonden zijn met de referentie, bijv. de veiligheidsaarde. Door de systemen in metalen kasten te plaatsen, veronderstellen we dat stoorsignalen alleen via geleiding van buiten naar binnen kunnen. De signaalkabel is gekarakteriseerd door de gekoppelde zelfinducties L_w, de koppel-capaciteiten

C_w en de serie-weerstanden R_w.

S_1 en S_2 vormen, samen met de verbindingen, een z.g. aardlus. Deze lus is weliswaar niet galvansich gesloten (pc-boards van S_1 zwevend), maar bestaat toch via de capaciteit C_1 tussen pc-boards en kast.

In de lus kan een EM-veld een common-modespanning opwekken, V_{cm}, die op de in Fig. 7 aangegeven plaats gedacht mag worden. Common-mode (ook wel asymmetrisch genoemd) omdat deze bron het gehele systeem 2 laat „dansen" t.o.v. S_1. Ook andere stoorbronnen, zoals stromen door de referentie-leiding en koppelingen met naburige kabels of systemen, kunnen tot V_{cm} bijdragen, vandaar dat het zinvol is de doorwerking van V_{cm} naar een ongewenst signaal, V_o, over R_L nader te beschouwen.

Veronderstel eerst eens dat de frequentie van V_{cm} zo laag is, dat in het model de invloed van L_w en C_w verwaarloosd mag worden. In dat geval is het schema in Fig. 8 equivalent met dat in Fig. 7 en zijn o.m. de volgende conclusies omtrent V_o te trekken:

a) Als $R_g = R_L$ en $R_w \ll (R_g + R_L)$, bijv. $R_g = R_L = 50$ Ohm en $R_w = 0{,}05$ Ohm, dan is $V_o = 1/2\ V_a$, waarbij V_a de spanning is over de „aard-tak", zie Fig. 8.

b) Als $R_L \gg R_g$, bijv. $R_L = 1$ Mohm, dan is zelfs $V_o = V_a$.

c) De grootte van V_a wordt bepaald door de spanningsdeler, gevormd door (voornamelijk) C_1 en $(R_w + Z_{c1} + Z_{c2})$. Als $C_1 = 0$, dus pc-boards S_1 met de kast doorverbonden, dan is in dit model $V_a = V_{cm}$!

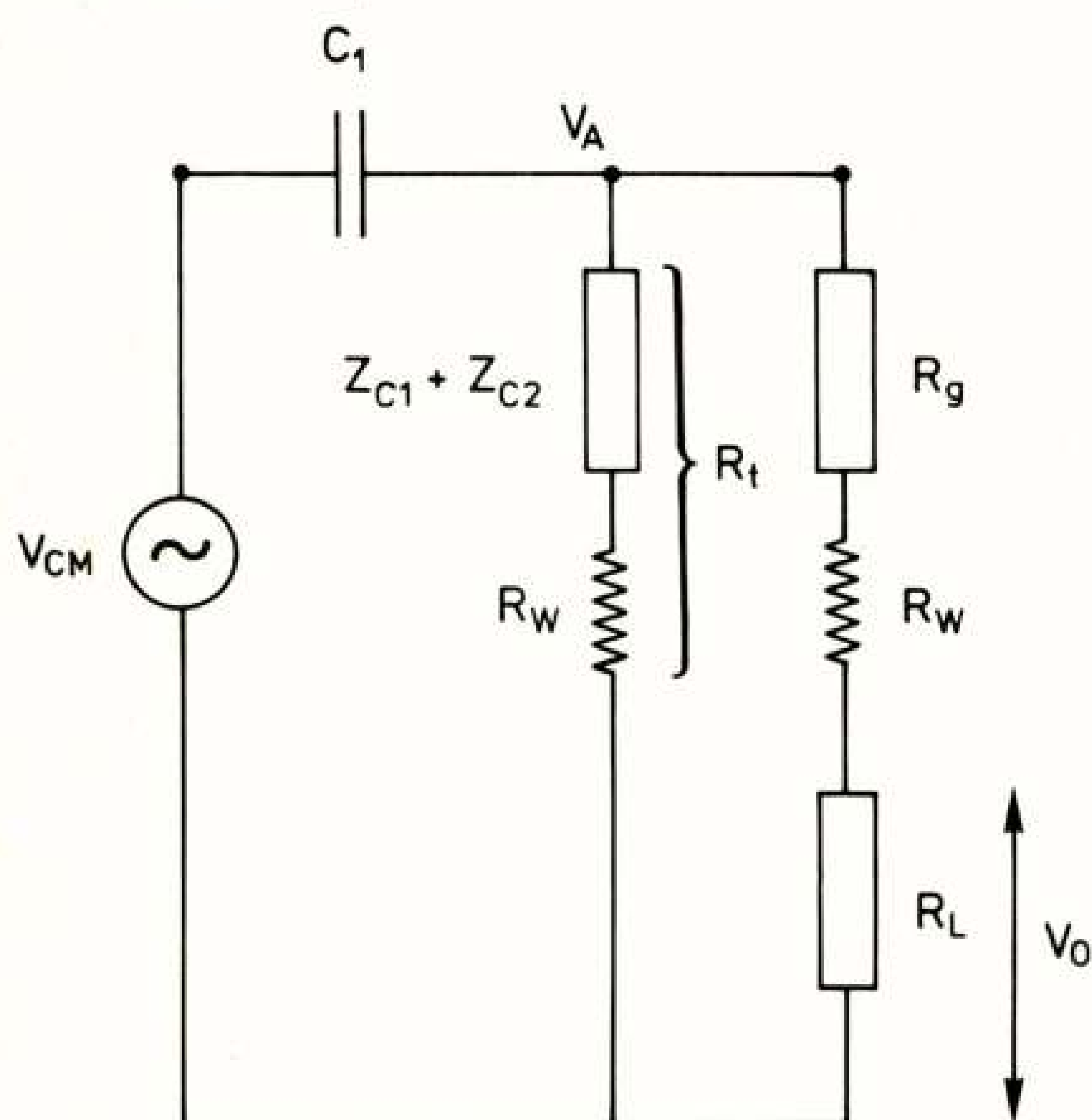


Fig. 8. Laag-frequent equivalent schema bij Fig. 7.

Uit c) volgt onmiddellijk dat het van zeer groot belang is dat $R_t = R_w + Z_{c1} + Z_{c2}$ zeer klein is, anders werkt (bij een door het systeem gegeven C_1) de spanningsdeler niet. Zeer klein betekent bijv. $< 0{,}1$ Ohm. In het voorbeeld van par. 5 bleek de onjuiste afmontage van de coax tot waarden van enkele Ohms te leiden (de varkensstaartjes onder de schroefjes). Ook is het duidelijk dat op pc-boards aardsporen gebonden moeten zijn aan een maximale impedantie, dus aan een minimale breedte: de doorverbinding alleen, waarover men vaak bij CAD van een print reeds verheugd is, is dus niet voldoende.

We beschouwen nu frequenties van V_{cm}, die zo hoog zijn dat L_w niet meer verwaarloosbaar is. (Het geval dat C_w ook mee doet laten we hier buiten beschouwing.) Er geldt nu:

$$V_a = I_1 \cdot (R_t + j\omega(L_w - M)) \tag{4}$$

waarbij I_1 de stroom door de aardtak is en M de wederzijdse inductie is tussen de twee „kabelspoelen" L_w, zie Fig. 7. We merken op dat als $L_w = M$, dus als de koppelfactor $k = 1$, de situatie van Fig. 8 is teruggekeerd, hetgeen nogmaals het belang van de zeer lage waarde van R_t accentueert.

De voorwaarde $k = 1$ wordt door een coax-kabel dicht benaderd, omdat de coaxmantel het veld van de binnengeleider erg goed omsluit. Voor een veel gebruikt type 50-Ohm coax, de RG 58/U, wordt $k = 0{,}996$ gevonden. Precies 1 is met een coax met één enkele vlechtmantel niet te bereiken omdat er altijd nog wat veldlijnen door de mazen van het vlechtwerk ontsnappen.

De kwaliteit van „dicht" zijn van een coax wordt meestal uitgedrukt in de z.g. transfer-impedantie, Z_T, uitgedrukt in Ohm voor 1 meter kabel. Indien de invloeden van het skin-effect zijn te verwaarlozen, hetgeen hier het geval is, kan het hierboven beschreven model te hulp geroepen worden, en is Z_T te schrijven als:

$$Z_T = R_w + j\omega(L_w - M) = R_w + j\omega L_T \tag{5}$$

$L_T = L_w - M$ wordt door de kabelfabrikanten soms de niet-gecompenseerde zelfinductie genoemd. Een voorbeeld van Z_T als functie van de frequentie is gegeven in Fig. 9 (getrokken lijn) voor 1 meter van de genoemde RG 58/U kabel, waarvoor geldt $R_w = 0{,}015$ Ohm, $L_T = 4$ nH (merk op: L_w is ongeveer 1000 nH). Uit Fig. 9 (getrokken lijn) volgt dat per meter kabel er voor elke mA stroom door de coaxmantel reeds 1 mV stoorsignaal ontstaat bij een frequentie van 60 MHz. Het is dus beslist onjuist als men zegt (of denkt): „Ik werk met coax, dus afgeschermd". Omdat de mantel van de coax deel uitmaakt van het gewenste signaalcircuit lopen storingen zeer gemakkelijk naar binnen.

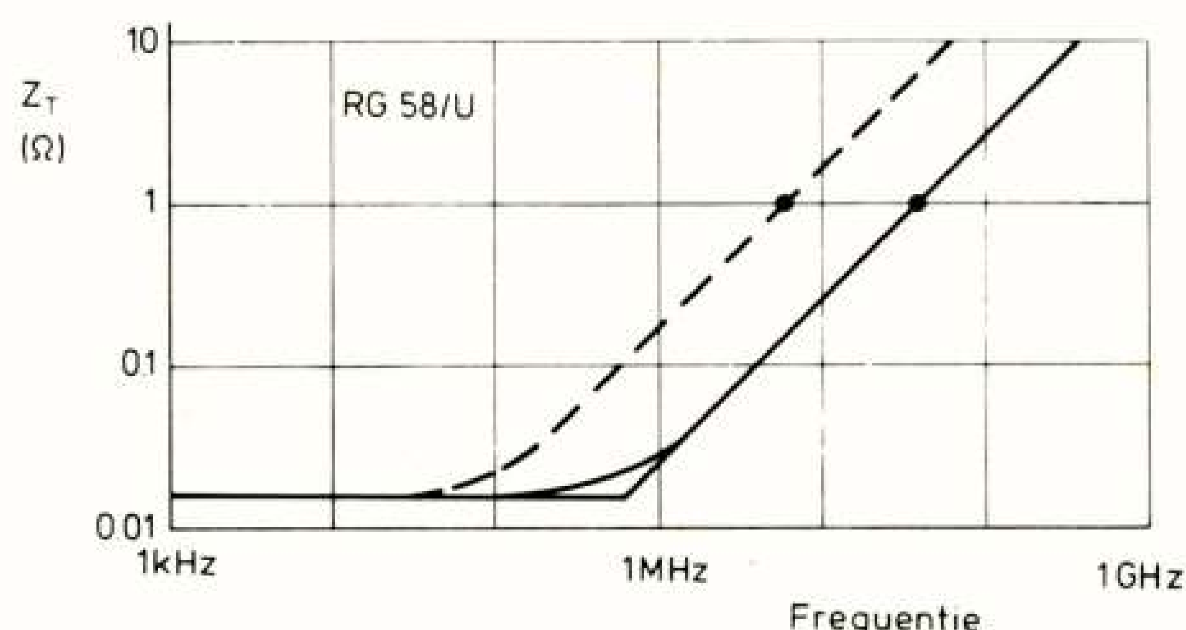


Fig. 9. Transfer-impedantie van 1 meter RG 58/U coax-kabel.
—— kabel alleen, - - - kabel met 2 cm varkensstaart.

In het voorbeeld van par. 5 werden de varkensstaartjes vermeld. Deze hebben een ongunstige invloed op Z_T van de gehele kabel omdat hun zelfinductie, ca. 1 nH/mm, nauwelijks gekoppeld is met de binnengeleider van de coax. Z_T wordt dan bepaald door

$$Z_T = R_w + j\omega(L_T + L_p) \tag{6}$$

waar L_p de zelfinductie is van het varkensstaartje. De gestreepte lijn in Fig. 9 geldt voor het geval van 2 cm varkensstaartje aan 1 meter kabel. In dat geval wordt 1 mV/mA al bereikt bij een frequentie van 8 MHz.

Uit het voorgaande volgt dus dat het zeer belanrijk is een kabel op een juiste manier af te monteren. Dit kost nauwelijks iets meer en voorkomt vele dure acties achteraf.

7. STOORGEVOELIGHEID HALFGELEIDERSCHAKELINGEN

In deze paragraaf een voorbeeld van de storingsgevoeligheid van halfgeleiderschakelingen en van preventieve maatregelen, die reeds bij het ontwerp van de schakelingen genomen kunnen worden.

In Fig. 10 is een deel van het schema van een audio-systeem weergegeven. Bij A bevindt zich een IC met daarin een voorversterker en een eindversterker. De ontwerper van deze schakeling had in zijn oplei-

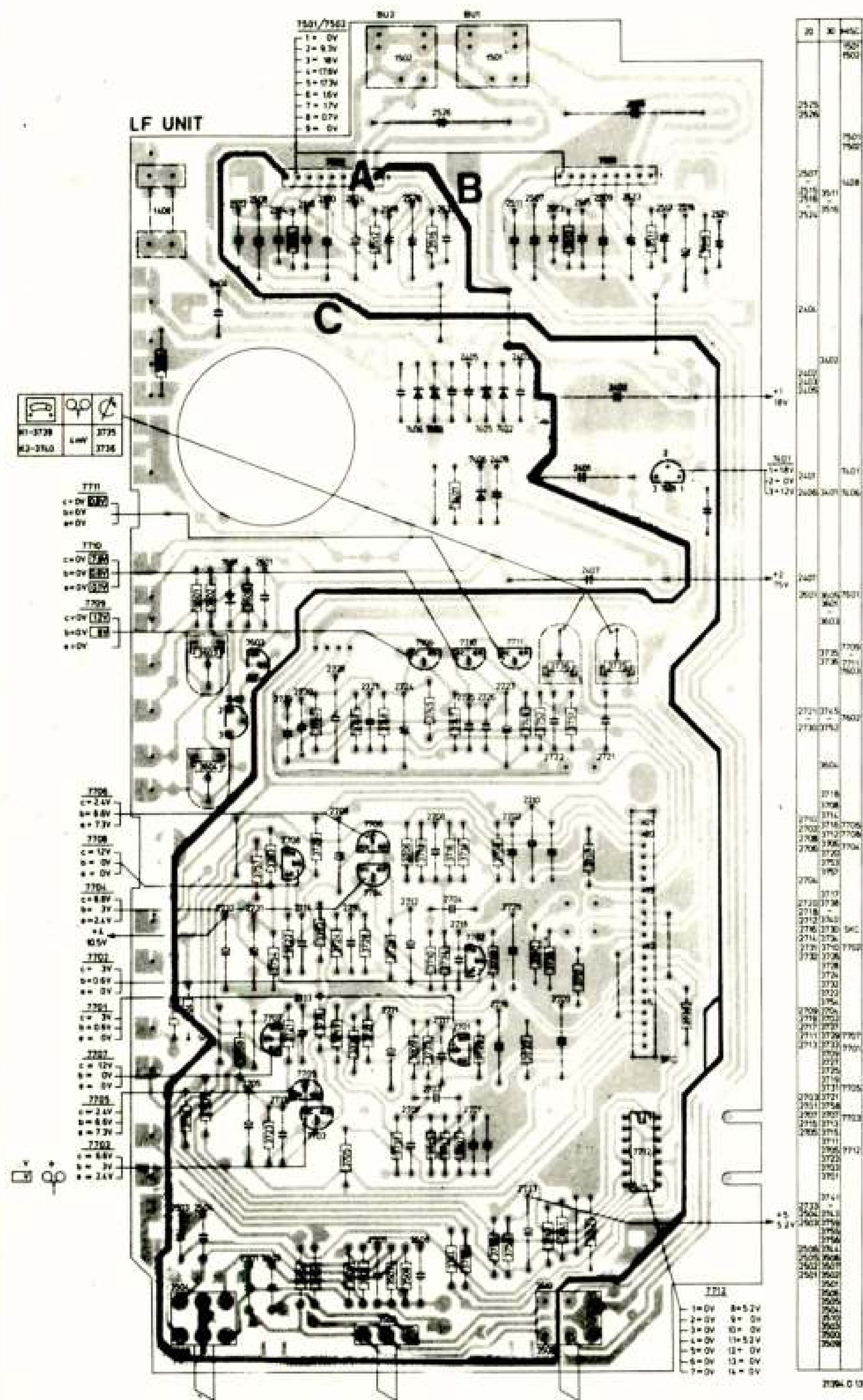


Fig. 10. Printplaat in een audio systeem, zie tekst.

ding geleerd dat, om ongewenste terugkoppeling te voorkomen, de stroom door de nulgeleider van de eindversterker niet door die van de van de voorversterker mag lopen. Hij heeft dit principe keurig toegepast: spoor B loopt van de eindversterker naar de gelijkrichter en spoor C doet dat voor de voorversterker. Helaas is traject C erg lang geworden, omdat de voorversterker vanaf het voorpaneel geregeld moet kunnen worden (balans, toonregeling, etc.). Bovendien is er een grote antennelus ontstaan die hoogfrequent velden (bijv. van een naburige fysiotherapeut, een „bakkie", een oproep-installatie, etc.) kan ontvangen. Komt het ontvangen signaal bij een transistor in het IC, dan werkt de basis--emitter-diode precies zo als de ouderwetse kristaldetector. In het geval van een AM-gemoduleerd zendsignaal ontstaat een audio „in-band"-signaal, dat uiteindelijk luid en duidelijk uit de luidspreker komt.

Een provisorische oplossing van het probleem (er is later een re-design van de print gekomen) is te zien in Fig. 11. Er is een zeer laagimpedante verbinding gemaakt tussen de nul van de voorversterker en die van de eindversterker d.m.v. een stuk koperfolie. Dit folie kon tevens gebruikt worden om d.m.v. condensatoren een aantal andere transistoren op de print HF te ontkoppelen, [13].

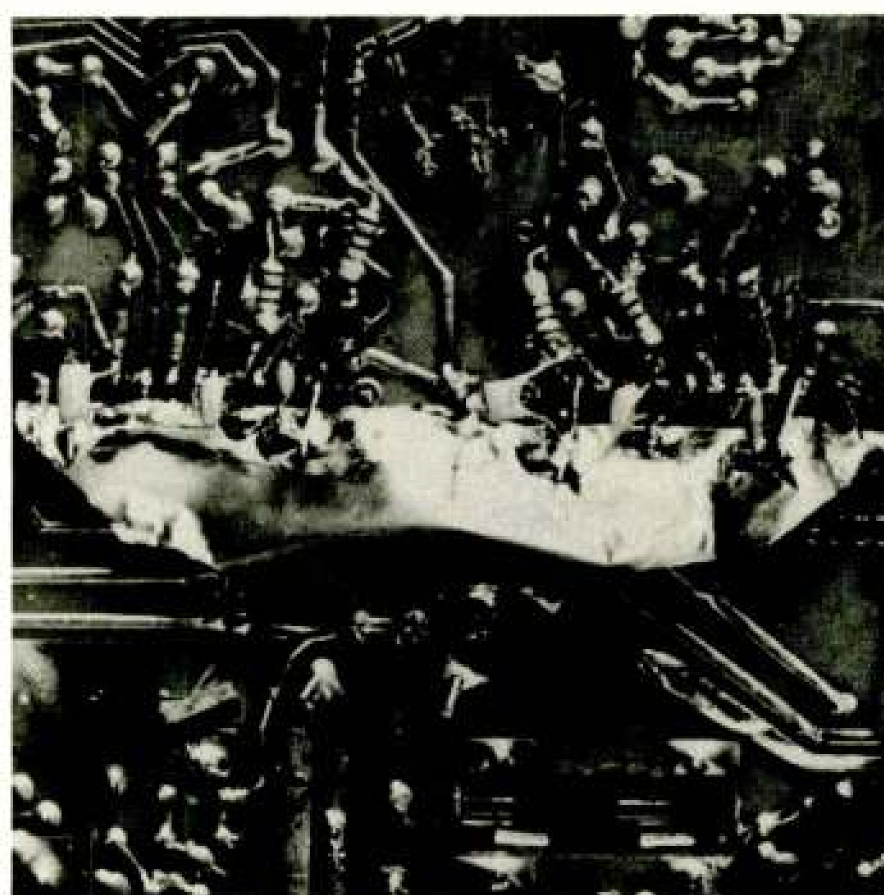


Fig. 11. Noodmaatregelen ter ontstoring IC, als bij A in Fig. 10.

Het blijkt dus dat een, op zichzelf, goed uitgangspunt tot ongewenste resultaten kan leiden, wanneer het apparaat buiten zijn beschermde ontwerp-omgeving komt. Verder volgt dat het realiseren van immuniteit, zonder hoge kosten te maken, alleen kan als dit vanaf het begin van het ontwerp meegenomen wordt. Alvorens hiervan een voorbeeld te geven, eerst nog enkele opmerkingen over de gevoeligheid van halfgeleiderschakelingen voor HF-signalen.

Fig. 12, overgenomen uit [14], toont transistor-karakteristieken met en zonder HF-signaal tussen basis en collector. Wanneer we ons in deze figuren een belasting-lijn voorstellen, dan zal het duidelijk zijn dat de invloed van HF-signalen zich niet tot analoge schakelingen beperkt. Veel werk aan de verklaring van dit soort effecten is verricht door Wahlen en zijn medewerkers, [15]. Toch is er nog geen transistor-model dat de effecten voorspelt, wel een model waarin achteraf de parameters zijn aan te passen. Met programma's als NCAP en SPICE wordt getracht inzicht te verkrijgen [16].

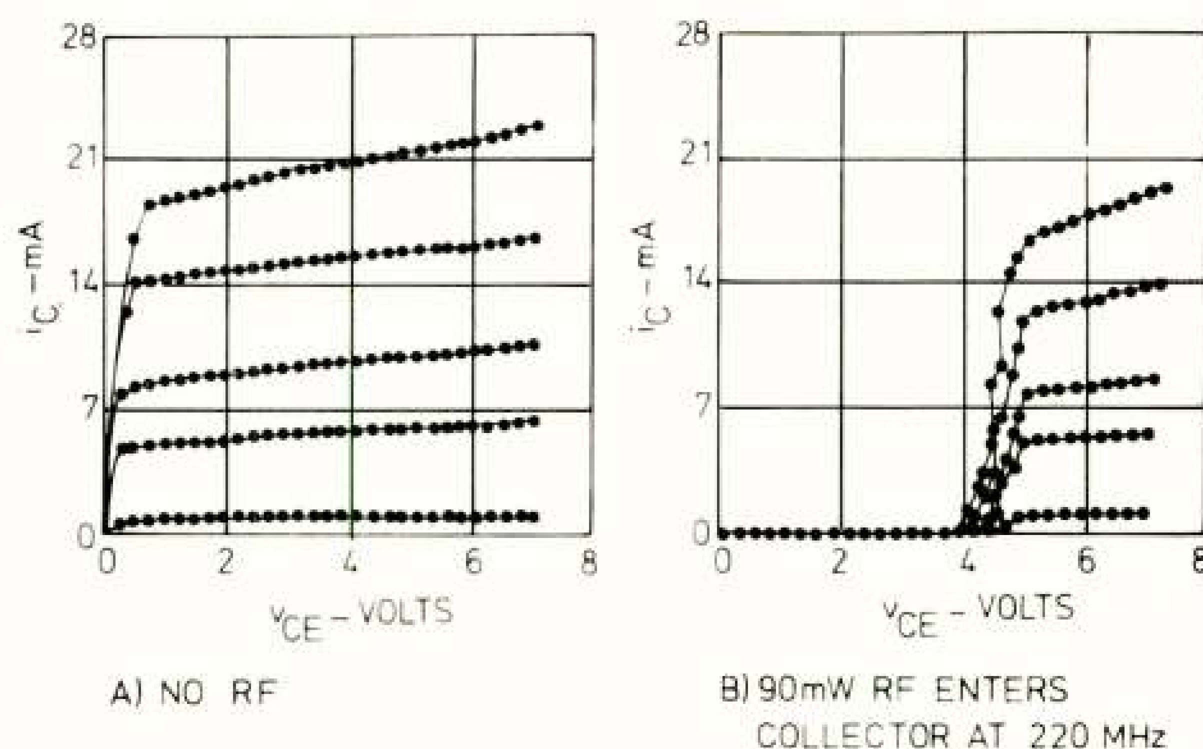


Fig. 12. Transistor-karakteristieken met HF-signaal tussen basis en collector, volgens [14].

Is dus het HF-signaal eenmaal bij de transistor, dan zijn de ongewenste effecten als gevolg van niet-lineariteiten niet meer te voorkomen. Het ontwerp moet daarom zo gemaakt worden dat geen ongewenst HF-signaal bij een transistor kan komen. Een mogelijkheid biedt het „inpakken" van de schakelingen in metalen omhullingen. In het bijzonder bij consumenten-elektronica is deze oplossing echter te duur en kan ook volledig onpraktisch zijn (TV-kijken in een kooi van Faraday). Wat kan wel gedaan worden?

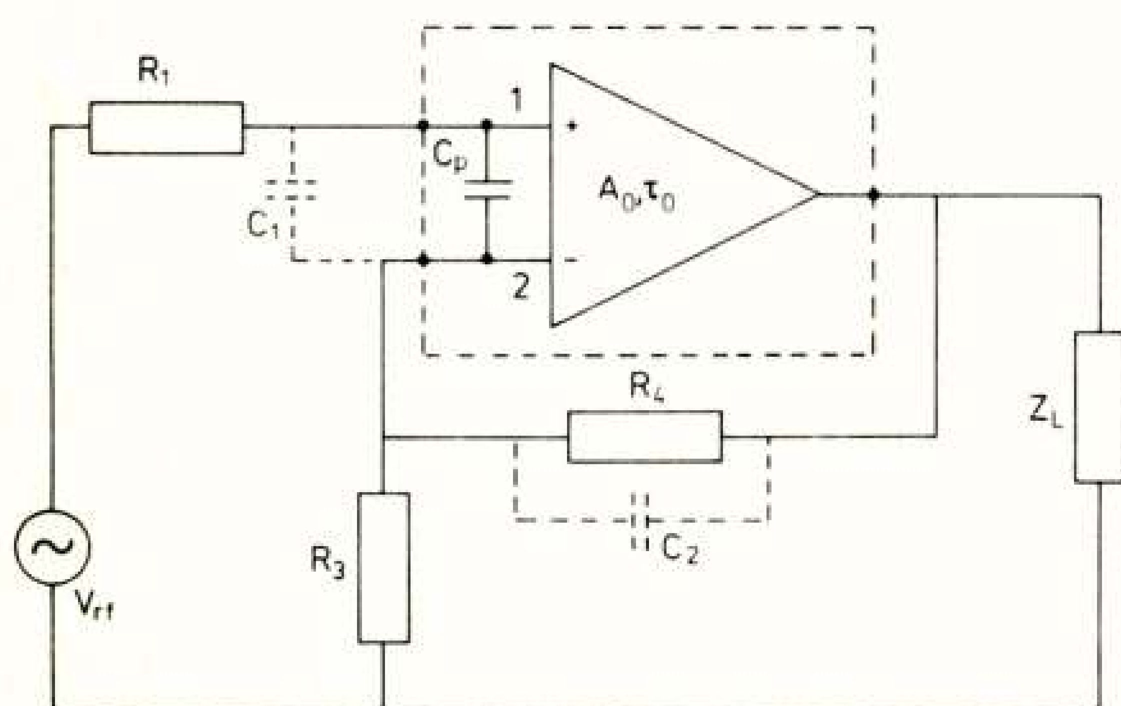


Fig. 13. Operationele versterker met tegenkoppeling.

In Fig. 13 is een schakeling gegeven van een operationele versterker (op-amp) met tegenkoppeling. We beschouwen nu de invloed van dat HF-signaal dat gerepresenteerd kan worden door de bron V_{rf}. Laten we de gestreept getekende condensatoren in Fig. 13 even weg, dan toont Fig. 14 de spanning V_{12} tussen de plus- en de min-ingang, als functie van de frequentie en genormeerd op V_{rf}. In het algemeen zal een ontwerper alleen bij stabiliteits-onderzoek aandacht besteden aan frequenties $f > B$, waarbij B de bandbreedte is van het gewenste signaal. In fig. 14 zien we echter dat bij hoge frequenties $V_{12}/V_{rf} = 1$ wordt, hetgeen inhoudt dat daar het volle stoorsignaal over de ingang van de op-amp staat, dus nagenoeg direct op de detecterende transistoren. Bij nog hogere frequenties neemt V_{12}/V_{rf} weer af, als gevolg van

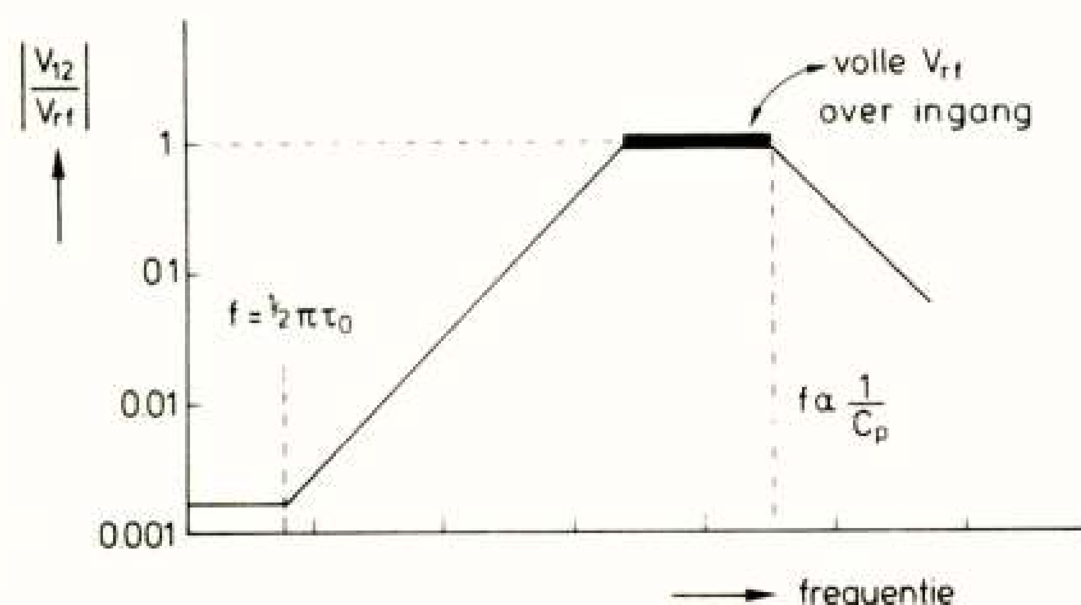


Fig. 14. Genormeerde ingangsspanning bij schakeling in Fig. 13, zonder condensatoren.

parasitaire capaciteiten in de op-amp. Dit suggereert dat een oplossing van het probleem gevonden kan worden in het kunstmatig vergroten van deze parasitaire C, hetgeen in Fig. 13 gedaan is door C_1 aan te brengen. Teneinde de schakeling stabiel te houden moet C_2 worden toegevoegd. C_1 en C_2 kunnen vooraf berekend worden, rekening houdend met de specificaties voor het gewenste signaal, de stabiliteit van de schakeling en eventuele verdere randvoorwaarden. Fig. 15 toont een resultaat van deze beschouwingswijze, zie [17]. In die figuur is de dc-shift aan de uitgang van de schakeling, als gevolg van V_{rf} aan de ingang weergegeven. De curve „predicted" is bepaald door uit te gaan van de curve „original" en de reductie in V_{12}/V_{rf} als gevolg van het aanbrengen van

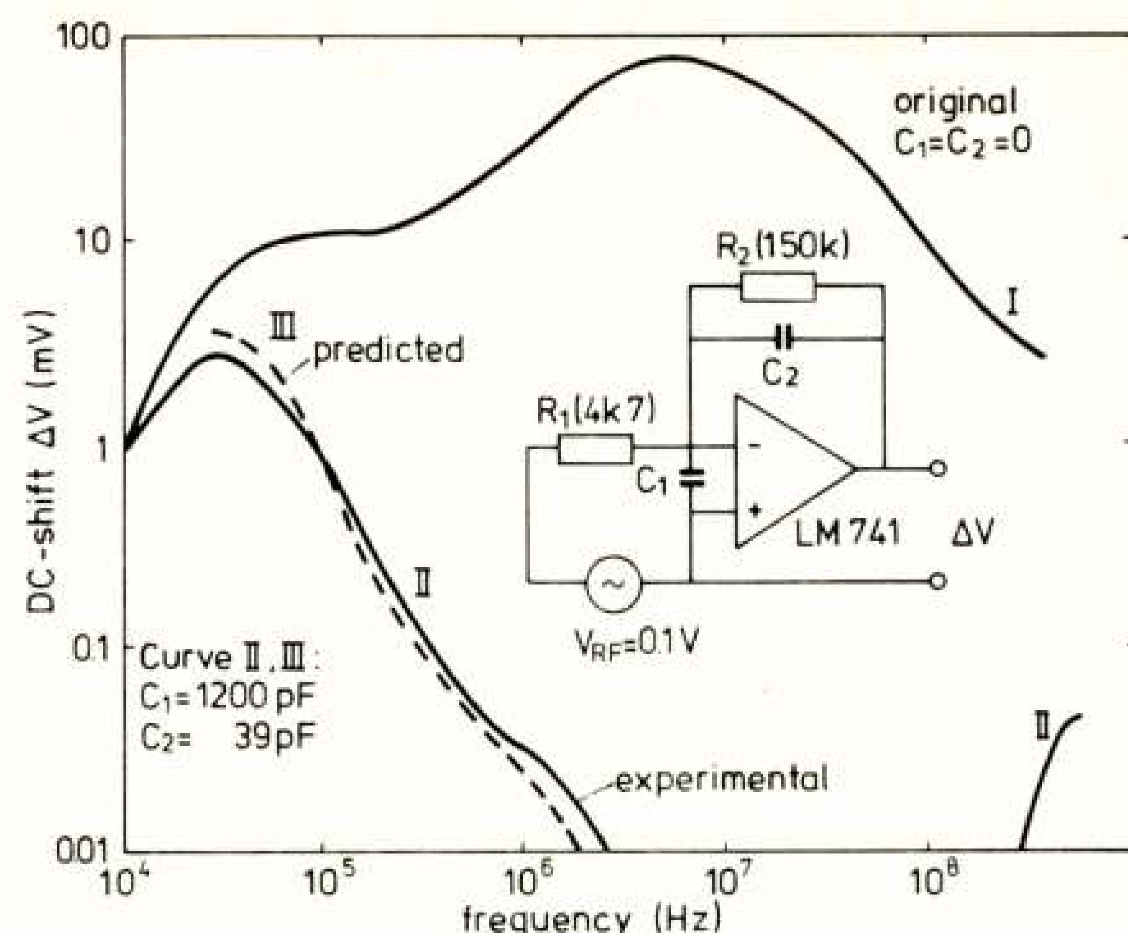


Fig. 15. Immuniteits-verbetering van de aangegeven schakeling door toevoeging van C_1 en C_2.

C_1 en C_2. Daarbij werd verondersteld dat het verband tussen V_{12} en ΔV kwadratisch is. Aan de laag-frequente kant van de grafiek zien we goede overeenstemming met de gemeten waarden, aan de hoog-frequente kant wordt de afwijking veroorzaakt door de parasitaire zelfinductie van de gebruikte condensatoren.

8. SLOTWOORD

In deze voordracht is getracht om naast een aantal EMC-zaken die betrekking hebben op het op de markt brengen van apparaten, ook een paar facetten van het vakgebied te schetsen. Het moge duidelijk geworden zijn dat het van essentieel belang is EMC-beschouwingen vanaf het ontwerpstadium van een systeem mee te nemen. Zo niet, dan resulteren: langere ontwikkeltijden, stagnerende produkties, veel klachten en goodwill-verlies, kortom: de extra kosten rijzen de pan uit. Het is daarom dringend noodzakelijk dat het technisch onderwijs op alle niveaus EMC-zaken in haar pakket opneemt. Zij die daar niet op kunnen wachten, kunnen nuttig gebruik maken van de boeken [18] en [19]. Daarbij is [18] zeer geschikt voor ontwerpers en ontwikkelaars „ in het veld", terwijl [19] goed aandacht besteedt aan begripszaken. Meer gevorderden kunnen ook nog nuttige informatie halen uit [20], indien zij enig inzicht hebben in de geldigheid van de modellen. De auteur van [20] laat zich daar meestal niet over uit, zodat zijn resultaten niet altijd geldig zijn.

LITERATUUR

1. Publicatieblad van de Europesche Gemeenschappen, Richtlijn 82/499/EEG, „Radiostoring veroorzaakt door huishoudelijke elektrische apparaten, draagbaar gereedschap en soortgelijke apparatuur", L 222, **25**, 30 juli 1982.
2. Federal Communications Commission, "Rules and regulations", Part 15: "Radio Frequency Devices", Part 18: "Industrial, Scientific and Medical Equipment", Vol. II, juli 1982.
3. Amtsblatt des Bundesministers für das Post- und Fernmelde-wesen, Vfg. 1115/1982, „Funk-Entstörung von Hochfrequenzgeräten für Industrielle, Wissenschaftliche, Medizinische und ähnliche Zwecke", **158**, 1982.

4. CISPR Publication 11, "Limits and methods of measurement of radio interference characteristics of ISM radio-frequency equipment", IEC Genève, 1975.
5. H. Rehder, „Störspannungen in Niederspannungsnetzen", ETZ, **100,** pp. 216-220, Mai 1979.
6. E.A. Chun, O. Walker, IEC TC77/WG6, persoonlijke mededeling.
7. CISPR Publication 16, "Specification for radio interference measuring apparatus and measurement methods", IEC, Genève, 1977.
8. CISPR/E/WG1 (Groenevld) 2, "The consequences of the 80% - 80% statistical procedure as described by CISPR", Febr. 1979.
9. British Standards Institution, "Specifications for radio interference limits and measurement for television and VHF sound receivers", BS 905, London, 1969.
10. Amtsblatt des Bundesministers für das Post- und Fernemeldewesen, „Technische Vorschrifte für Ton- und Fernseh-Rundfunkempfänger", Vfg. 478/1981, **69,** 1981.
11. M. Wink, Philips-Video, persoonlijke mededeling.
12. Publicatieblad van de Europesche Gemeenschappen, ontwerp voorstel Richtlijn 71/316, „Meetmiddelen en Metrologische Controlemethoden", C 42/9, **22,** 1979.
13. „Einstrahlstörungen", Funkschau, 22, 1980, (Sonderheft).
14. C.E. Larson, J.M. Roe, "A modified Ebers-Moll transistor model for interference analysis", 3rd Electromagnetic Compatability Symposium, pp. 257-262, Rotterdam, 1979.
15. J.J. Whalen, "Current status of determining EMI in microelectronics", 4th Electromagnetic Compatibility Symposium, pp. 141-145, Zürich, 1981.
16. G.K.C. Chen, J.J. Wahlen, "Comparative RFI performances of bipolar operational amplifiers", 1981 IEEE Intern. EMC Symposium Record, pp. 91-95, Boulder, Colorado, 1981.
17. J.J. Goedbloed, K. Riemens, A.J. Stienstra, "Increasing the RFI immunity of amplifiers with negative feedback", 5th EMC Symposium, pp. 471-476, Zürich, March 1983.
18. D. Stoll, "EMC", Elitera Verlag, Berlin, 1976.
19. H.W. Ott, "Noise reduction techniques in electronic systems", J. Wiley & Sons, New York, 1976.
20. D.R.J. White, "EMI control methodology and procedures", DWCI, Gainesville, 1979.

Voordracht gehouden tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 310), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie, op 4 november 1982 in de Afdeling Elektrotechniek van THD.

Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

311e werkvergadering

UITNODIGING
voor de lezingendag op donderdag 18 november 1982 op het Dr. Neher Laboratorium in Leidschendam.
Thema: Beeld- en Tekst systemen

Dit is de tweede lezingendag van de door de Sectie Telecommunicatie techniek KIvI in samenwerking met het NERG en de Beneluxsectie van het IEEE georganiseerde cyclus over kantoorautomatisering.







PROGRAMMA-OPZET
De ochtendlezingen zijn - naast de opening (waarin een samenvatting van de eerste lezingendag op 1 september 1982) - gewijd aan Videotex en de mogelijkheden daarvan in kantoorautomatisering en kantoorcommunicatie:

De middaglezingen zijn gewijd aan andere vormen van beeld- en tekstcommunicatie, aan tekstverwerking en aan lokale netten voor deze communicatie (LAN's).

09.00 uur:	Openstelling van de zaal, koffie.	
09.30 uur:	Opening en korte samenvatting van de eerste lezingendag, IR.R.C. STRATO, SECTIE TELECOMMUNICATIE KIVI.	Foto 1
09.45 uur:	Toepassing van viditel in het kantoor, ING. D. TEN HOVE, PTT DCT VIDITEL.	
10.30 uur:	Koffiepauze.	
10.45 uur:	Transportel: Viditel als communicatiemiddel voor de transportwereld, HR. H. OOSTEROM, SIJTHOF PERS.	
11.30 uur:	Demonstraties Viditel.	
12.00 uur:	Lunch.	
13.30 uur:	Papier of beeldscherm, DRS. M.J. RAAYMAKERS, EXECUTIVE DIRECTOR OCÉ NEDERLAND B.V.	
14.10 uur:	Theepauze.	
14.25 uur:	Grafische mogelijkheden van Teletex en Videotex, IR. J.P. DE VRIES, PTT DNL.	Foto 2
15.10 uur:	EMS, een voorbeeld van elektronische kantoorcommunicatie, IR. JELLE KOK, SIEMENS NEDERLAND N.V.	Foto 3
15.50 uur:	Discussie.	
16.00 uur:	Sluiting.	

Aanmelding voor de lezingendag dient te geschieden vóór 9 november door het insturen van de antwoordkaart onder gelijktijdige voldoening van de kosten voor deelname: *f* 25,— (inklusief lunch) op postrekening 576595 t.n.v. penningmeester van de sectie Telecommunicatie te Oosterhout onder vermelding van ''Beeld- en Tekstsystemen''.

Den Haag, oktober 1982.

Namens de samenwerkende verenigingen,
IR. R. C. STRATO.
Tel. 070 - 782640 (overdag)

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN AEROSPACE VEHICLES

Ir. O.B.M. Pietersen
National Aerospace Laboratory NLR

Electromagnetic Compatibility in aerospace vehicles requires always very careful consideration because of the generally high packing density of electronic equipment aboard aircraft or spacecraft, the complex cable harness and the required reliability margins. This article reviews the practical and computer aided methods which are in use to arrive at an undisturbed living together of electronic systems aboard these vehicles.

INTRODUCTION

Electromagnetic Compability (EMC) between systems aboard aircraft or spacecraft may be disturbed in the following ways:

- functionally generated signals are received by a non dedicated receiver. For example, the electromagnetic field radiated by an aircraft antenna may be received by another antenna on the fuselage; or the digital datastream on a data bus could cause interference on sensitive wires through cable coupling.
- non-functionally generated signals may be present at "input terminals" of a receiver. For example spikes on power lines can be coupled into sensitive circuits if the distance between the circuits is not large enough.

In order to come to EMC one could use a specification approach, relying on compliance to EMI specifications for each of the subsystems. However, this specification based approach may be, even with reduced testing, expensive because interference suppression measures will sometimes be taken when it is not necessary. One has also little visibility into system performance in the design stage, prior to testing.

A computer aided approach, i.e. predicting undesired situations by computation, is often attractive: it can give insight in the problems, the effect of specific measures can be calculated, or at least estimated, before implementation, and it helps for setting up the specification requirements. A drawback of this kind of analysis may be the high initialization cost, viz. for devising a computer program and for modelling the EMC problem itself. However, for simple configurations, simple programs can do the job: even hand-held calculator programs exist. In more complex situations, larger computerprograms are needed.

But, as a matter of fact, specifications neither computerprograms provide for EMC. Therefore a short review of practical guidelines is presented at the end of this paper.

A CASE HISTORY

Because testing of equipment on EMI, Electromagnetic Interference, is time consuming, thus expensive, and can only be carried out meaningfully at the end of a project, when time always becomes a critical factor, one often wanders if EMI tests are really necessary, have to be that extensive, are cost effective etc. And indeed, it is mostly very difficult to pin-point EMI as the cause of a mission failure. Therefore a short case-history is reported here.

In 1976 experiments were carried out by a dutch working group on cosmic radiation in which sounding rockets were launched. Measurement data from these rockets were sent by telemetry to the earth. After a few minutes of measurement time, the equipment was due to fall into the ocean, and was lost. At a particular shot, no useful data was received and the surmise was raised that EMI could have been the problem. The next payload was tested on its sensitivity to radiation. From these trials it turned out that the multiwire sensor, the equipment that counts the cosmic radiation, was sensitive to electromagnetic radiation with amplitude modulation. This modulation also proved to be present in the FM telemetry transmitter signal when it was modulated with a high data rate. Measures were taken therefore to make the sensor less sensitive, which resulted in success with the next launch. Extensive EMI testing prior to launching of the first rocket is believed to have detected this senstivity. That would have resulted in a definite economy.

Of course, not always is the positive result of EMI testing that clear. The quality of the equipment however will often improve because either serious or less optimum interference situation are detected, and adequate measures are taken.

THE SPECIFICATION APPROACH

For aerospace applications, a number of specifications exist which give procedures for testing electronic systems or subsystems. These are aimed at measuring the

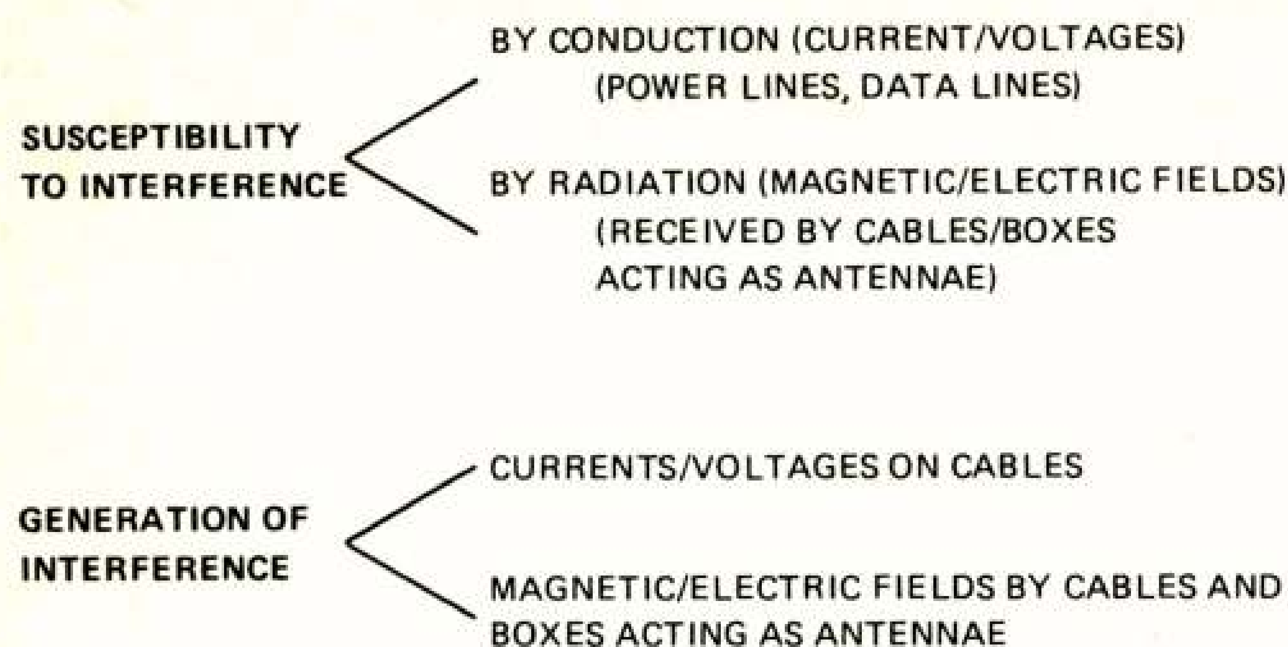


Fig. 1: Interference phenomena

amount of interference the systems generate and at the determination of their sensitivity to interference. Test procedures and limits are given for Conducted Emission (CE), Conducted Susceptibility (CS), Radiated Emission (RE) and Radiated Susceptibility (RS) (Fig. 1). Fig. 2 shows a survey of the more important specifications in aircraft EMI testing. For space applications one sometimes uses a subset of the MIL-STD 461/462 specifications (Ref. 1,2), or devises specific procedures based on these, often with different limits. ESA, the European Space Agency, has issued its own EMC specification (Ref. 3).

The overall specification for military equipments is MIL-E-6051D, which states that, in order to arrive at Electromagnetic Compability, all subsystems aboard aircraft have to meet the limits given in MIL-STD 461 when the equipment is tested according to the procedures in MIL-STD 462. A closely related specification is MIL-STD 704B which deals with the characteristics of the aircraft

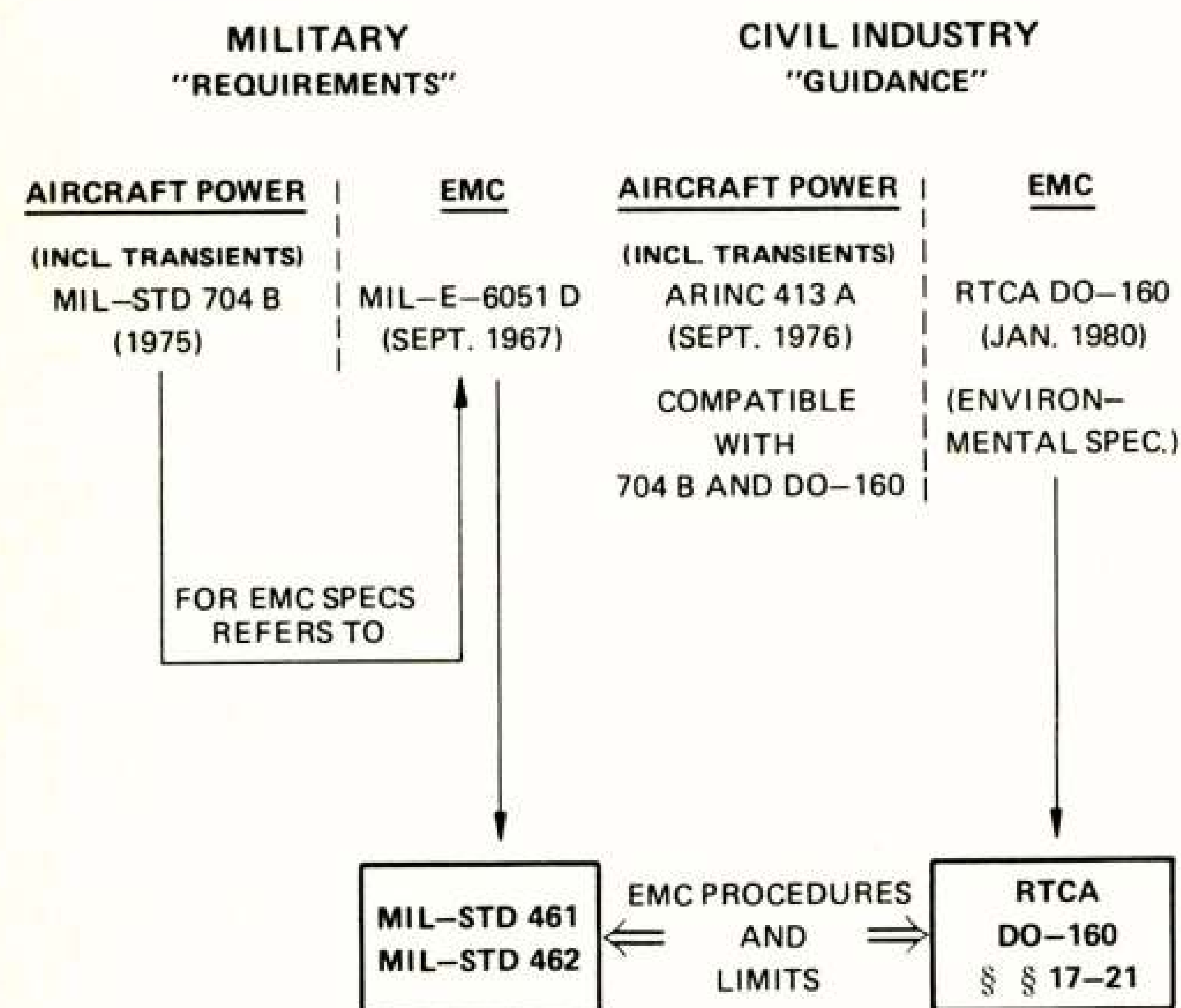


Fig. 2: Major EMI specifications for aircraft equipment

power systems, including the maximum transient voltages which may be expected to be present on power lines. While one speaks of 'requirements' in military applications, in civil industry the term 'guidance' is used in the documents. However, quite often the governmental aviation authorities, 'require' the equipment to comply with the applicable ARINC (Aeronautical Radio, Incorpo-

TABLE 1

Essentials of MIL-STD and RTCA EMI test procedures

MIL-STD		RTCA	
CONDUCTED EMISSION			
CE01	30 Hz – 15 kHz CURRENT, 130 dB μA max.		
CE03	15 kHz – 50 MHz 86 à 20 dB μA, NB 130 à 50 dB μA/MHz, BB	21.2	15 kHz – 30 MHz 75 à 20 dB μA, NB 120 à 50 dB μA/MHz, BB
CE07	SPIKES AC: ±50 % V_{nom} DC: +50/–150 % V_{nom}		
RADIATED EMISSION			
RE01	30 Hz – 50 kHz H–FIELD, 140 à 20 dBpT		
RE02	14 kHz – 10 GHz E–FIELD NB: 30 à 70 dB μV/m BB: 110 à 65 dB $\frac{\mu V}{m \cdot MHz}$	21.3	15 kHz – 1.215 GHz E–FIELD NB: 35 à 62 dB μV/m BB: 98 à 68 dB $\frac{\mu V}{m \cdot MHz}$
CONDUCTED SUSCEPTIBILITY			
CS01	30 Hz – 50 kHZ 5 à 1 Volt, CW	18	10 Hz – 150 kHz DC: 1.5 V_{max} AC: 5% V_{nom}
CS02	50 kHz – 400 MHz 1 Volt, MODULATED		90 kHz – 30 MHz 0.5 V_{max}, MODULATED
CS06	SPIKES ON POWER LEADS 200 V, 10 μs, 0.15 μs	17	SPIKES 600 V, 10 μs, t_r < 2 μs
CS09	60 Hz – 100 kHz STRUCTURE CURRENT, < 1 A		
RADIATED SUSCEPTIBILITY			
RS01	30 Hz – 50 kHz H–FIELD, 120 à 76 dBpT	19.3	400 Hz – 15 kHz, H–FIELD INDUCTION, 30 A – 0.8 A
		19.4	E–FIELD, 400 Hz, 1800 V/m
RS02	SPIKES, INDUCTION 20 A, 10 μs	19.5	SPIKES, INDUCTION 600 V, 3.5 A_{max}, 10 μs
RS02	POWER FREQ., INDUCTION FIELD, 20 A	19.2	POWER FREQ. INDUCTION, 20 A
RS03	14 kHz – 10/40 GHz ELECTRIC FIELD 5 à 10 V/m	20.3a	H–FIELD, 15 kHz – 35 MHz E–FIELD, 35 MHz – 1215 MHz 0.2 à 1 V/m

NB = Narrowband; BB = Broadband Interference

rated) and RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) specifications (Ref. 4, 5). A great many similarities exist between the RTCA and MIL-STD documents, in procedures, test set-ups and transducers used during testing. As far as the limit values are concerned, one observes slightly less severe limits in RTCA DO-160 than in MIL-STD 461 for most of the tests. However, RTCA is more stringent for broadband interference generated by switch circuitry, which is simulated in the testing with so-called spike generators. Table 1 shows the essentials of both specifications, while Figures 3 and 4 review the most commonly used transducers.

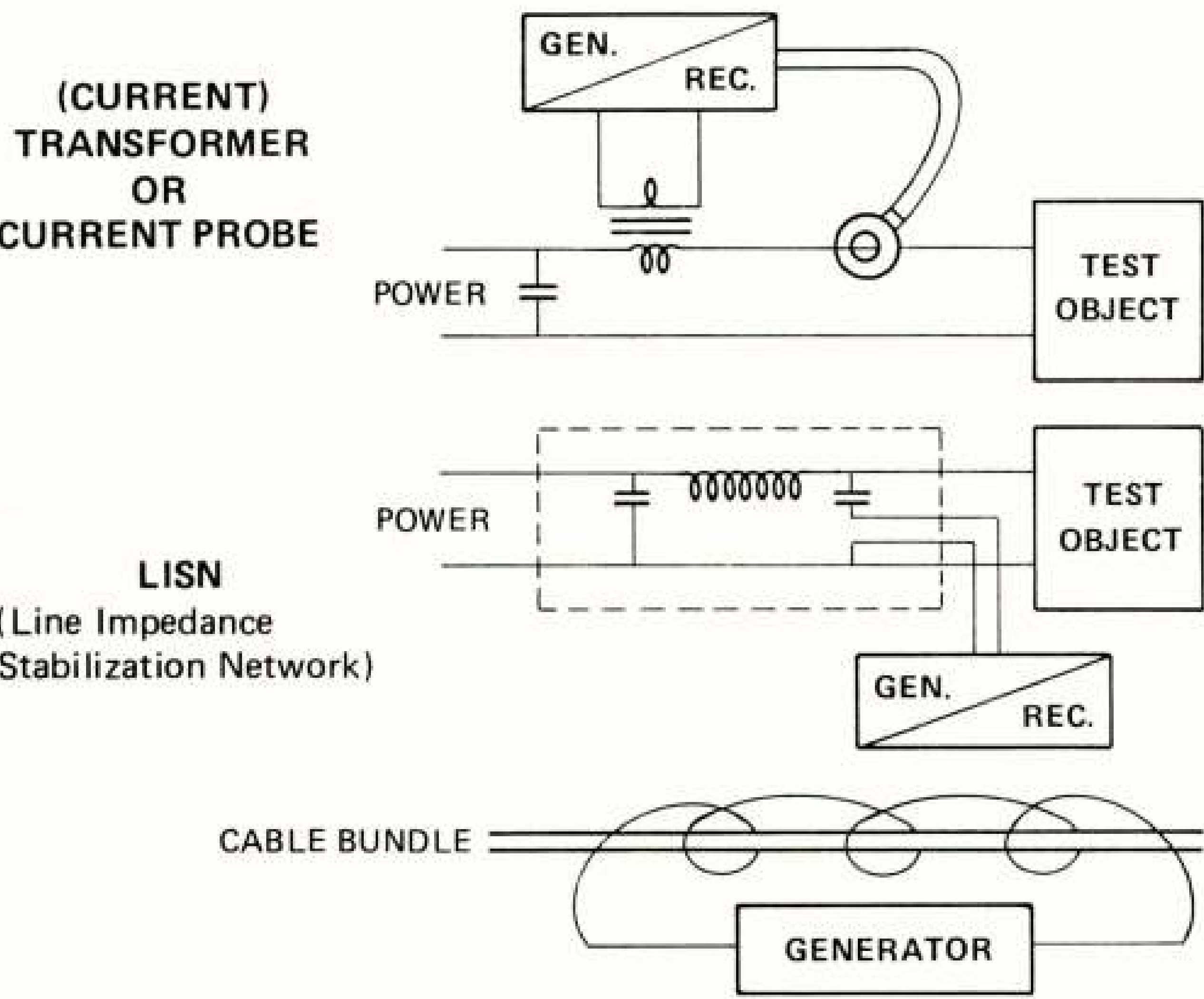


Fig. 3: Transducers for conduction tests

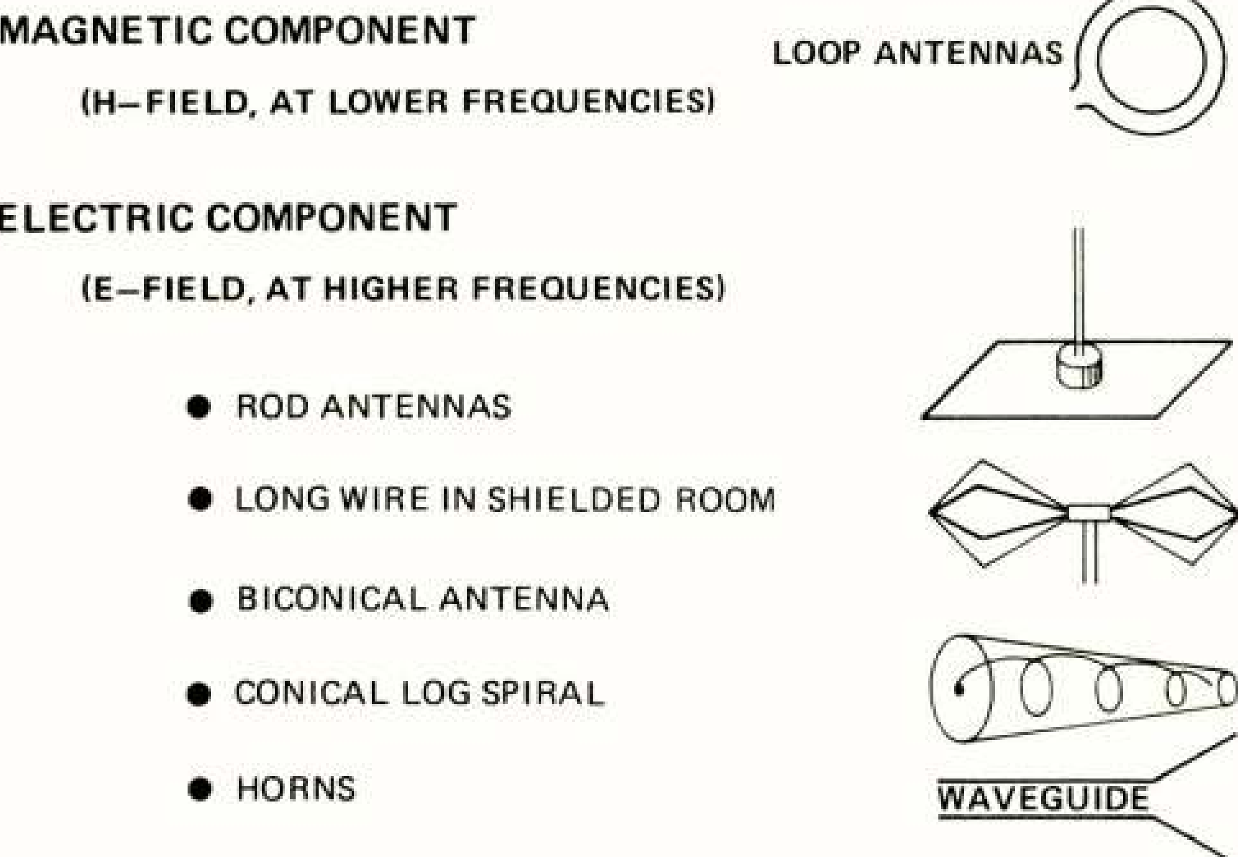


Fig. 4: Transducers for radiation tests

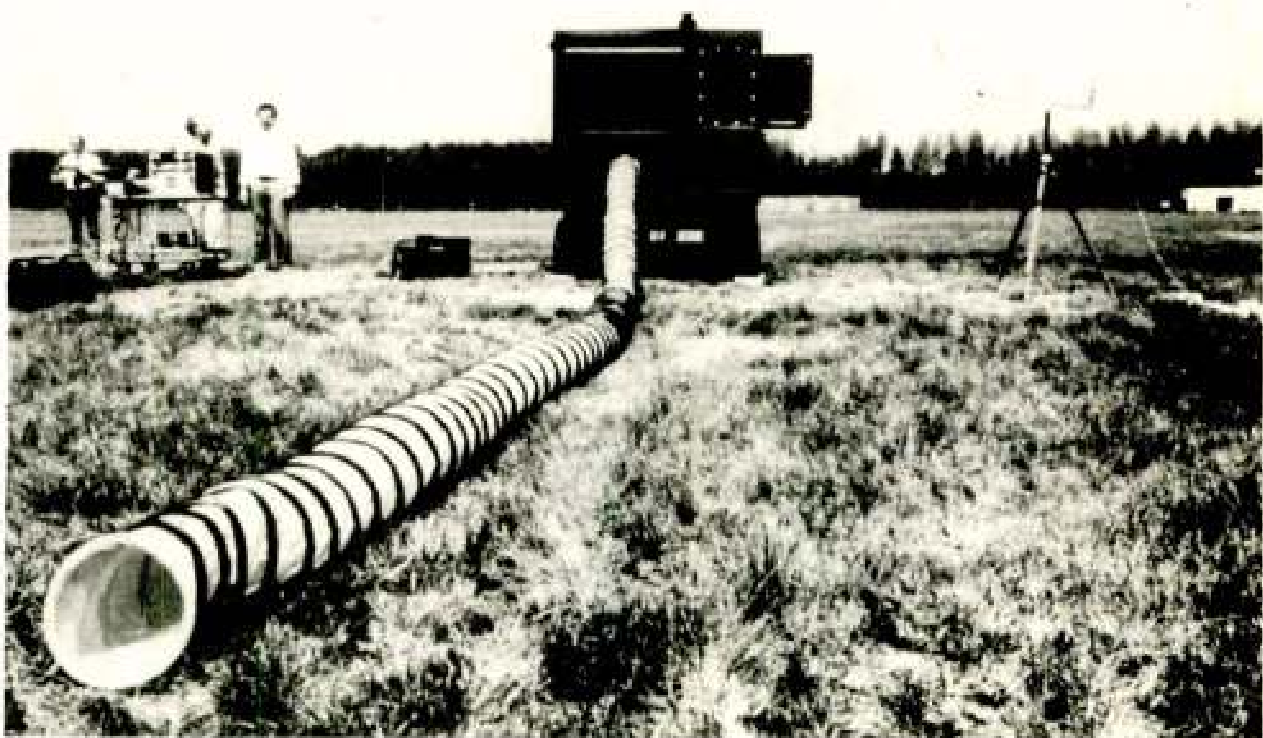


Fig. 5: Radiated susceptibility testing of large equipment

As a practical example of testing the susceptibility of electronic equipment, in figure 5 a photograph is shown, where an air conditioner unit for the F-16 on the flight-line is subjected to radiation. Here the test is carried out outdoors; however most EMI testing is performed within a shielded room ("Faraday cage"), containing RF absorbing material. Figure 6 shows a typical set-up.

Purpose of all EMC testing of course is to check if any equipment would generate a higher level of interference than the susceptibility threshold of other equipment. It has turned out that if equipments meet the specifications, EMC is achieved in all practical cases. However, the requirements are severe, are often hardly to meet and waivers have sometimes to be given. A combination of this specification approach with at least some theoretical modelling is thus useful, and sometimes even required if the specification limits can not be met in any way. By computer modelling an estimate of the interference margin can be made.

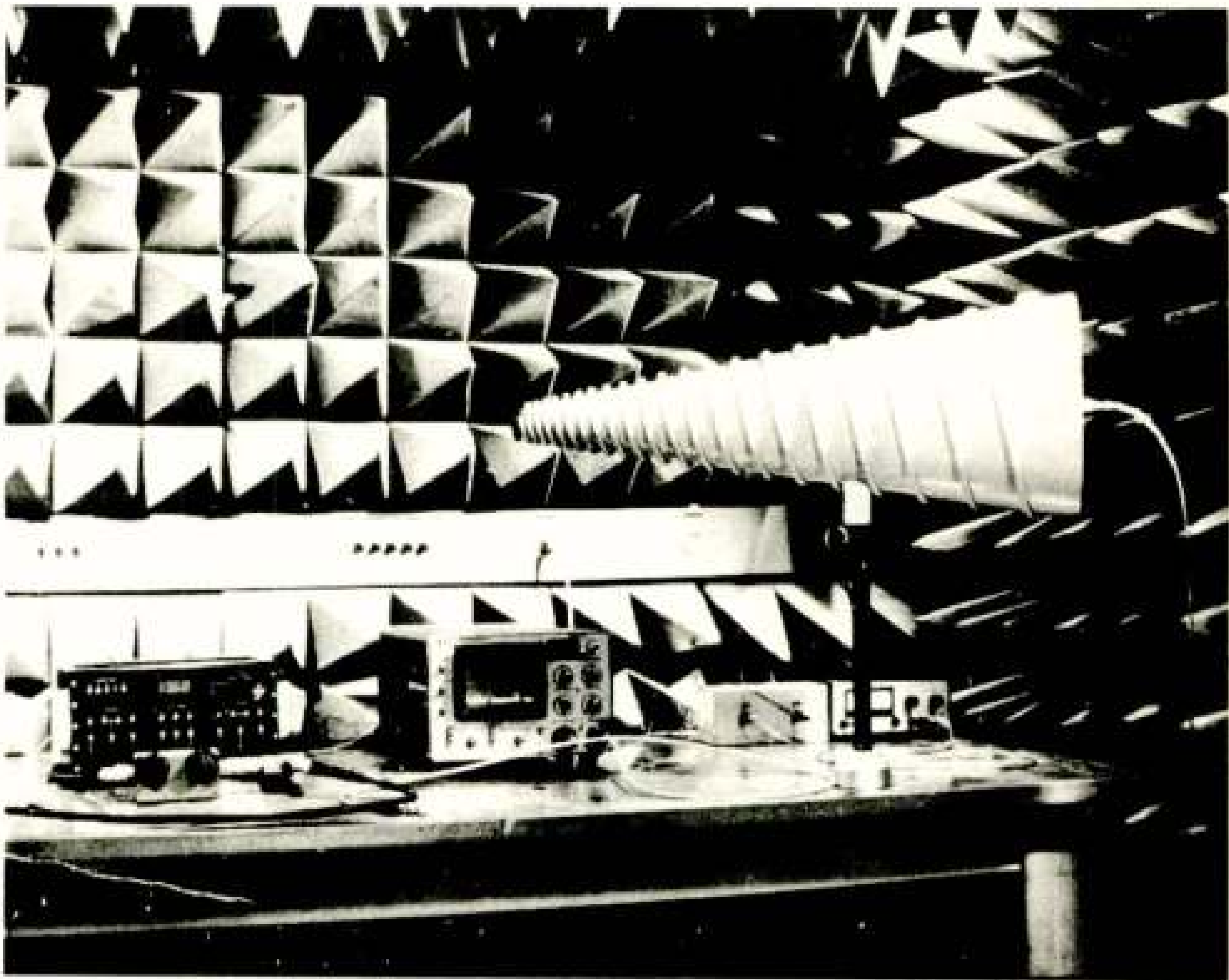


Fig. 6: EMI testing in anechoic shielded room

THE COMPUTER AIDED APPROACH

Advantages of a computer aided approach to arrive at EMC within a system are for example:

- effects of modifications can easily be evaluated
- testing may be reduced to the computed "hot spots"
- over designing for immunity to interference may be avoided, and as said before
- an estimate of the interference margin is obtained.

However, disadvantages are that

- the design and implementation of the program is expensive
- preparation of input data is often very time consuming
- the validation of the program is difficult
- interpretation of results requires skilled and experienced personnel.

At present at least two larger programs exist, viz. SEMCAP (System and Electromagnetic Compatibility Analysis Program) and IAP (Interference Analysis Program). The former was developed in the United States by TRW for NASA, and is now being used by several companies; in the Netherlands by the NLR. The second program is more recent, is developed by RADC (Rome Air Development Center) and is mainly used by the USAF (United States Air Force) and its contractors. References 6 and 7 are early technical papers describing the bases of these programs. As an example, some characteristics of the SEMCAP program will be given here (Ref. 8).

SEMCAP calculates the cross coupling between signal sources and receptors. The emitted signals may be functionally or non-functionally generated currents in hard wired circuits or electric or magnetic fields. Input data are among others the cable lengths, harness geometry, cable data, common impedances, generator signal wave shapes in the time domain or the frequency domain etc. The main output is comprised of the contributions of all generated signals into each modelled receptor, and the calculated margin between the sensitivity of that receptor and the received interference signal.
The basic equation which is solved is

$$|V| = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} |F_n(\omega) H_n(\omega) P(\omega)| d\omega \text{ where}$$

V = interference voltage at a receptor terminal
N = number of generators
F_n = spectrum of the signal of the nth generator
H_n = transfer function between n^{th} generator and the receptor
P = sensitivity of receptor
ω = $2\pi f$, f = frequency

The result of this summing of integrals is a "worst case" interference voltage, because phase information on F_n, H_n and P is not taken into account. This means, among others, that all interference signals are supposed to be present at the same time, and that inductive and capacitive effects are summed in phase. The main problem is the determination of $H(\omega)$. This factor, for example in case of cable to cable coupling, depends on a number of parameters, viz.

- input and output impedances of generator and receptor circuits
- distance between the circuits, orientation, parallel length
- height of the circuits above the ground plane
- type of cable, presence of shielding, number of grounding points of the shields, presence of twisting, length of the pigtails etc.

Figure 7 shows the generic model for the cable cross-talk coupling.

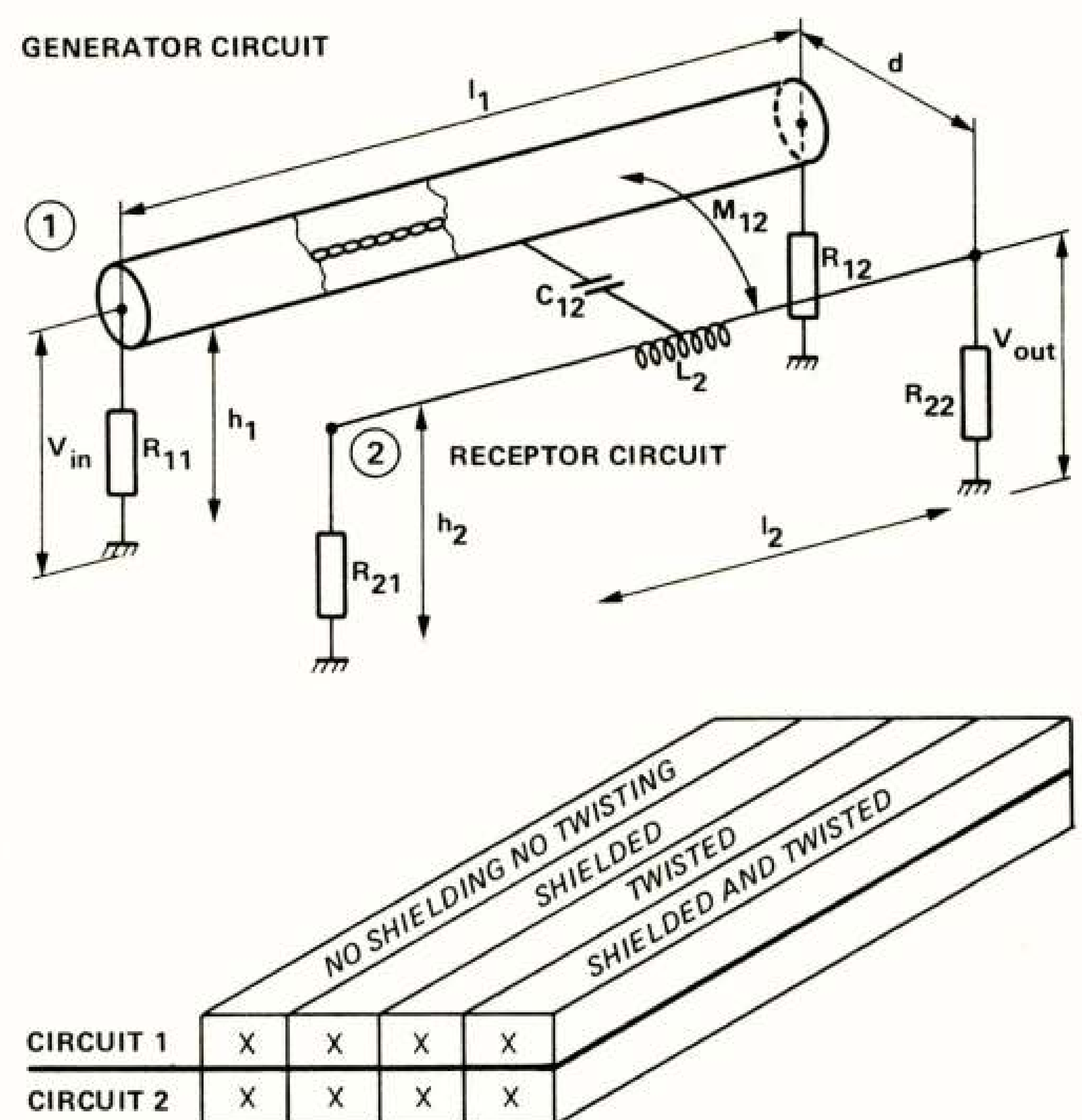
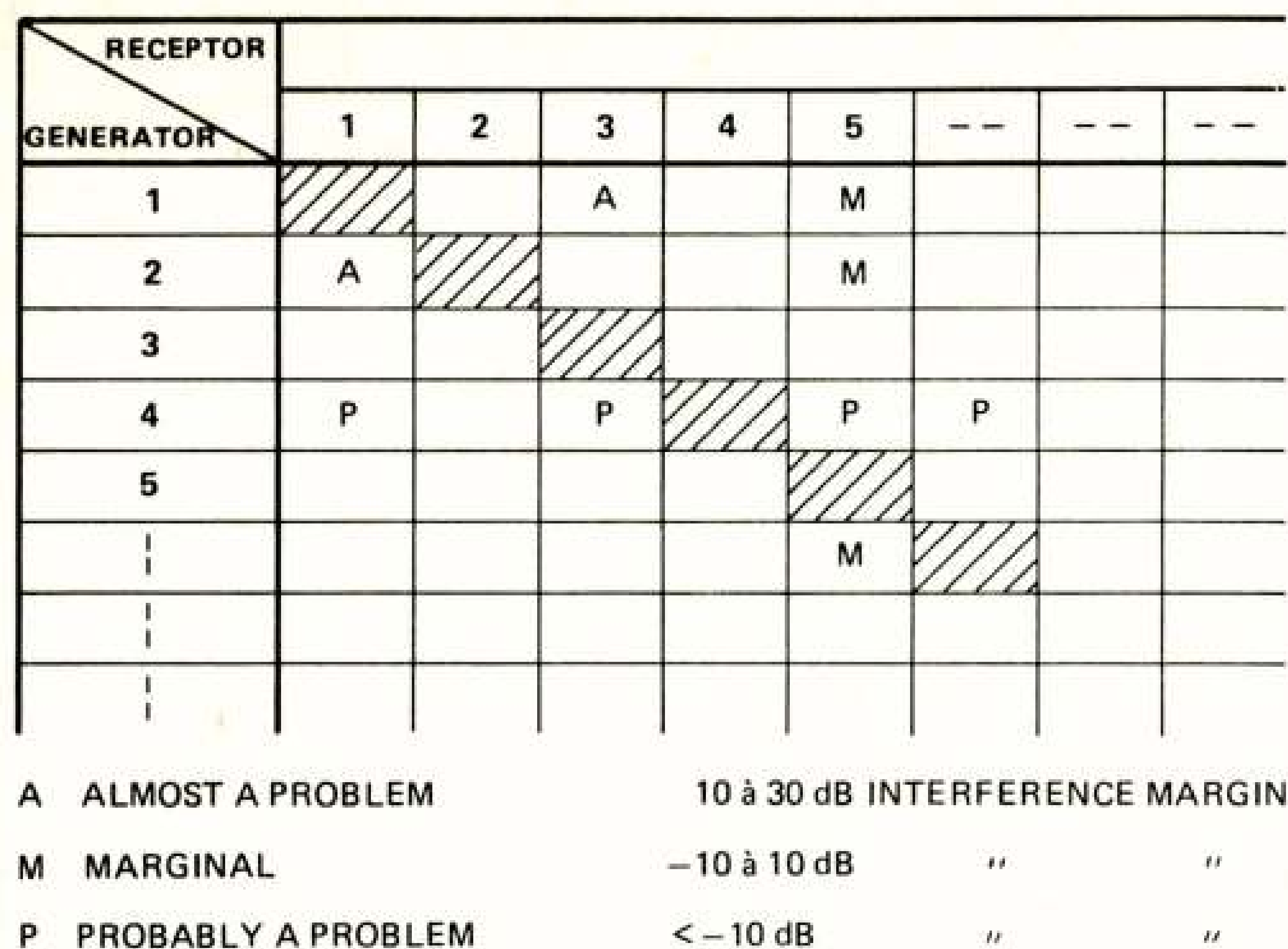


Fig. 7: Generic model for computation of cable cross-talk

The result of the computer program, after comparison with the susceptibility threshold of the receptor is summarized in a COMPATIBILITY MATRIX. This matrix shows an estimation of the possibility that unwanted interactions occur. Fig. 8 is an example of such output. Here it can be seen that generator 4 causes most of the problems and that receptor 5 is the most sensitive one. After studying the compatibility matrix one can

- detect possible hot spots
- print-out the characteristics of problem circuits
- analyse the time relations between the signals in the generator and receptor circuits
- make hardware recommendations on EMI suppression measures after computerized circuit modifications.



GENERATOR \ RECEPTOR	1	2	3	4	5	--	--	--
1			A		M			
2	A				M			
3								
4	P		P		P	P		
5								
¦					M			
¦								
¦								

A ALMOST A PROBLEM 10 à 30 dB INTERFERENCE MARGIN

M MARGINAL −10 à 10 dB " "

P PROBABLY A PROBLEM < −10 dB " "

Fig. 8: Compatibility matrix

Besides these large computer programs, small pocket-calculator based programs exist which compute interference margins on a one-to-one basis, using simplified lay-outs of the harness geometry. Extensive information on this approach can be found for example in reference [9]. Fig. 9 shows a comparison between measured data, computed data with SEMCAP and computed data with a small program. From this and many other tests it can be concluded that the algorithms used in the SEMCAP programs are reasonably accurate and certainly better than those for small calculators. However, the accuracy diminishes if the number of circuits within one cable bandle increases. Modelling of the shielding of circuits by the wires of other circuits is still a problem.

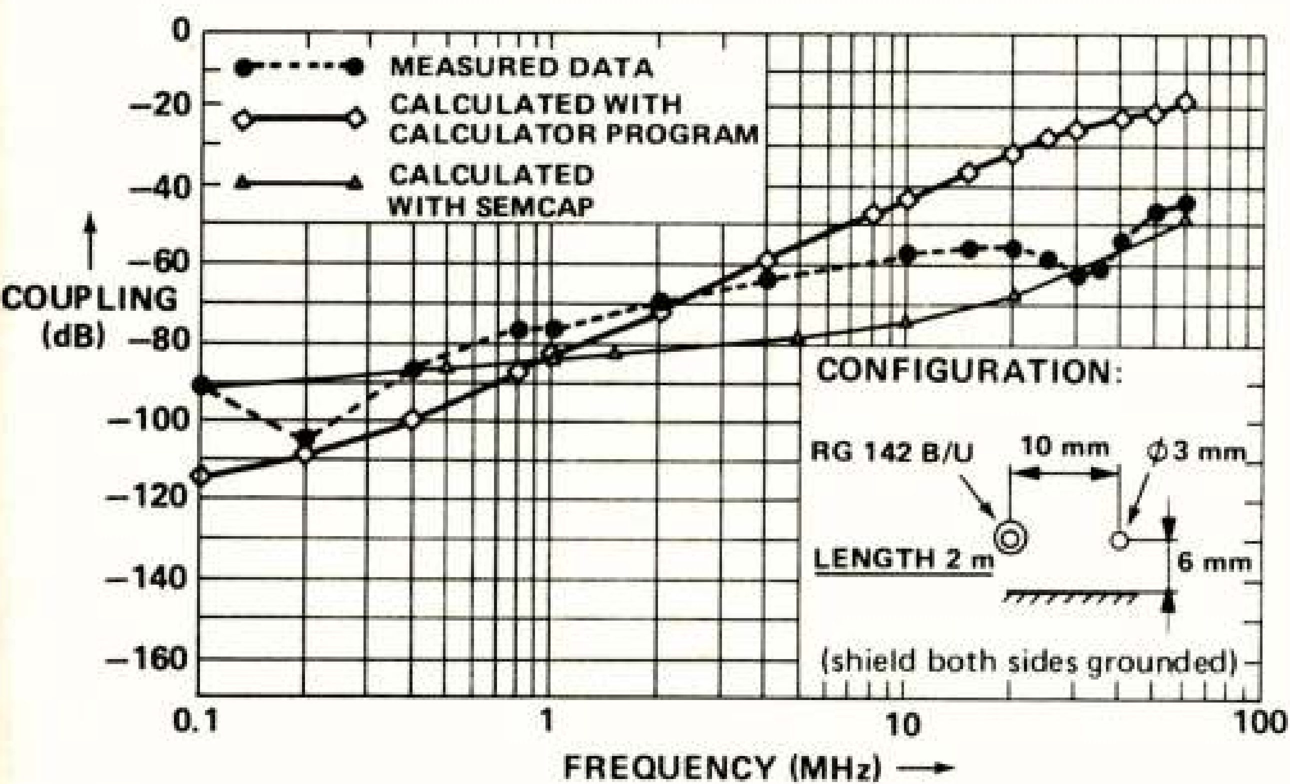


Fig. 9: Coupling between a shielded and an unshielded wire

SOME GUIDELINES

Electromagnetic Compability is of course not achieved by extensive testing or computerized prediction. It is achieved by careful engineering, being alert on potential EMI incompatibilities. The following guidelines may be helpful to attain EMC when designing a complex electronic system:

- use two-wire configurations, avoid structure returns
- design circuit bandwidth tailored to the signal bandwidth
- limit the bandwith as much as possible
- use filters which reject both differential and common mode interference
- 1 mA currents may be a good compromise between sensitivity and generation of noise (Ref. 3)
- use static shields in transformers
- design a grounding concept
- centralized single point grounding systems are susceptable to noise; a distributed single point system is often the best choice
- direct bonding is preferred to indirect; avoid dissimilar materials in bonding
- divide cable harness in categories; for example into DC power, AC power, digital and sensitive analog circuits. Provide for space between the categories and use different connectors
- twisting is very effective until a few tens of MHz, provided the pigtails are small
- shielding: for audio and analog signals, ground shield at one side only, for high frequency (and digital) signals, ground shield at both sides
- don't use a shield as an intentional signal path.

CONCLUSION

Three aspects play a vital role in achieving Electromagnetic Compatibility in aerospace vehicles:

- EMI testing of equipments and subsystems,
- Computerized prediction of, in the main, cable coupling, and last but not least
- Design of EMC into the equipments by following basic ground rules.

These tools have in most cases proven to provide for an undisturbed functioning of electronic equipment, densily packed in little space.

REFERENCES

[1] - Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements for the control of Electromagnetic Interference.
Military Standard, MIL-STD-461B, 1980.

[2] - Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics. Military Standard, MIL-STD-462, 1971.

[3] Gustafson, N. ESA Standard on Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Systems. SPS/STD/1/002, 1980

[4] Guidance for aircraft electrical power utilization and transient protection. ARINC Specification No. 413A, 1976.

[5] - Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. RTCA/DO-160A, 1980.

[6] Bogdanor, J.L., Pearlman, R.A. and Siegel, M.D. Intrasystem Electromagnetic Analysis Program. RADC TR-74-342, 1974.

[7] Johnson, W.R., Spagon, J.A. and Thomas, A.K. Application of computer technology to the implementation of EMC programs. 1969 IEEE EMC Symposium Record.

[8] Pietersen, O.B.M. Computer aided EMC Analysis - A Review of available tools - NLR TR 77070, 1977

[9] White, D.R.J. A Handbook Series on Electromagnetic Compatibility. D. White Consultants, 1971-1975.

Voordracht gehouden tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 310), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie, op 4 november 1982 in de Afdeling der Elektrotechniek van THD.

DE EFFECTEN VAN EMP OP ELEKTRONISCHE SYSTEMEN

Ing. P.A.A. Sevat
Physisch Laboratorium TNO

The effects of EMP upon electronic systems. A nuclear explosion generates a very strong, transient electromagnetic field. This phenomenon is called the electromagnetic pulse (EMP). The EMP induces large voltages and currents in electrical and electronic systems, sufficient to cause malfunction and damage if protective measures are not employed. In this paper the generation of the EMP, its characteristics and the effects upon systems are discussed.

INLEIDING

Nucleaire explosies wekken zeer sterke elektrische en magnetische velden op die, afhankelijk van de explosiehoogte, over een zeer groot gedeelte van het aardoppervlak worden uitgestraald. Bij een explosie op bijv. 400 km hoogte heeft dit gebied de vorm van een cirkel met een diameter van ongeveer 4500 km. Het uitgestraalde elektromagnetische veld heeft in dit gebied een sterkte die binnen enkele tientallen nanoseconden een piekwaarde van tientallen kilovolts per meter bereikt. Dit impulsvormige verschijnsel, dat de "elektromagnetic pulse"(EMP) wordt genoemd, speelt zich in minder dan een milliseconde af.

De grote en vooral snelle veldsterkteveranderingen van de EMP induceren piekspanningen en piekstromen in elektrische geleiders die in vele gevallen groot genoeg zijn om hiermee verbonden gevoelige componenten te beschadigen. De meeste apparatuur bevat tegenwoordig talloze EMP-gevoelige elementen, zoals halfgeleider diodes, transistors, integrated circuits (IC's) zoals microprocessors, enz. De voortschrijdende automatisering en miniaturisering hebben tot gevolg dat steeds meer van deze moderne onderdelen worden toegepast, zodat een steeds groter gedeelte van onze samenleving kwetsbaar wordt voor EMP. Denk hierbij bijv. aan de meet- regel- en besturingscircuits van de elektriciteitscentrales, gasdistributie en procesindustrie en aan de verkeersregelsystemen, communicatie- en navigatiemiddelen, computers, enz.

De weg terug naar oude, veel minder gevoelige onderdelen zoals relais en elektronenbuizen is om begrijpelijke redenen afgesneden.

Onderzoek naar de kwetsbaarheid voor EMP wordt in Nederland uitgevoerd door het Physisch Laboratorium TNO. Dit onderzoek is gestart in 1970. Sindsdien zijn meer dan 100 objecten onderzocht. Het Laboratorium beschikt over drie EMP simulatoren en diverse computerprogramma's voor het analyseren van de effecten.

Alvorens verder op de kwetsbaarheid voor EMP in te gaan, zullen eerst het ontstaan, de voortplanting en de eigenschappen van de EMP worden toegelicht.

HET COMPTONPROCES

Bij een kernexplosie komt een deel van de aanwezige energie vrij in de vorm van initiële nucleaire straling. Deze is te onderscheiden in röntgenstraling, gammastraling en neutronen. De γ-straling en de neutronen zijn de belangrijkste oorzaken voor het ontstaan van de EMP. De röntgen- en gammastraling zijn elektromagnetische golven waarvan de frequentie maatgevend is voor de aanwezige energie. De neutronen zijn neutrale, niet geladen deeltjes waarvan de snelheid een maat is voor de meegegeven energie.

De initiële γ-straling verspreidt zich als een kort durende impuls met de snelheid van het licht vanuit het explosiecentrum naar buiten. Deze γ-impuls heeft een stijgtijd van enkele nanoseconden (1 ns = 10^{-9} sec.) en een duur van enkele tientallen ns. Hierdoor ontstaat een dunne, naar buiten expanderende bolvormige schil van γ-straling met een dikte van enkele meters.

De vrijkomende neutronen veroorzaken door botsingen tegen het omringende medium eveneens γ-straling. Deze indirecte γ-straling is minder intens en is over een langere periode uitgestrekt [1, 2].

Het is bekend dat wanneer een gas door elektromagnetische golven wordt bestraald, waarvan de frequentie hoger is dan ongeveer 10^{19} Hz, hieruit elektronen worden vrijgemaakt.

Röntgen- en gammastraling zijn elektromagnetische golven met een zeer hoge frequentie, nl. tussen 10^{17} en 10^{20} Hz, resp. 10^{19} en 10^{22} Hz. Volgens de quantumtheorie kan men zich de röntgen- en gammastraling ook voorstellen als een stroom van deeltjes, de fotonen geheten. Elk foton bevat een hoeveelheid energie $E = h.f$ joules, waarin f de frequentie en $h = 6,62 \times 10^{-34}$ joule sec. de constante van Planck is.

Wanneer een foton met lichtsnelheid tegen een luchtmolecuul botst, wordt hieruit een elektron vrijgemaakt dat naar de ontdekker hiervan comptonelektron wordt genoemd. Het foton staat bij de botsing een deel van zijn energie af aan het elektron en zet zijn weg in een gewijzigde richting voort (zie fig. 1). De verminderde energie komt

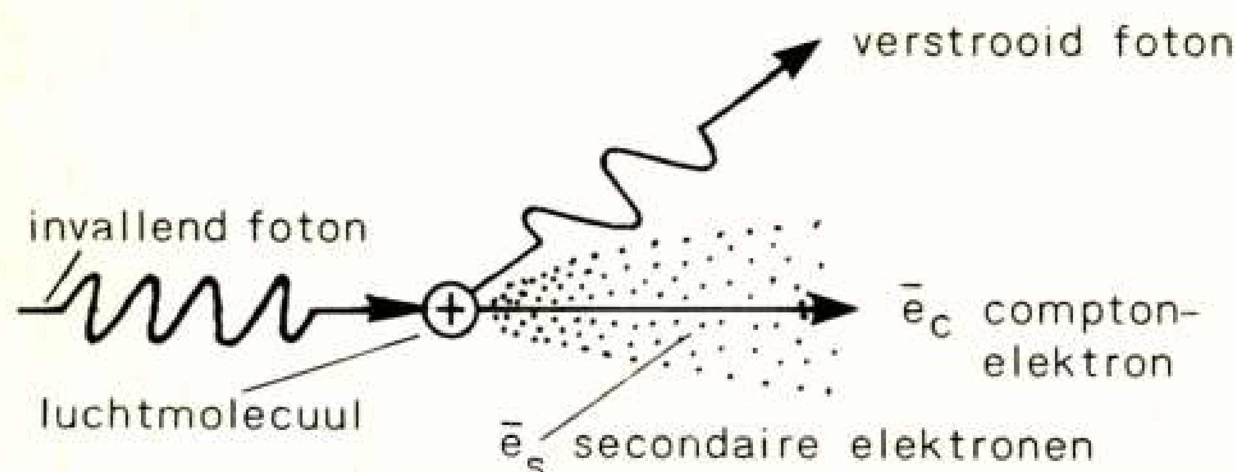


Fig. 1 Het comptonproces

tot uitdrukking in een lagere frequentie. Elk foton kan meerdere keren botsen, waarbij de frequentie steeds lager wordt, totdat de energie zover afgenomen is dat er geen comptonelektronen meer worden gevormd.
Het comptonelektron gebruikt een deel van zijn verkregen energie om zich los te maken van het luchtmolecuul en zet de rest om in kinetische energie. Bij de botsing blijft een positief geladen, zich trager bewegend ion (molecuulrestant) achter.

VOORWAARDEN VOOR HET UITSTRALEN VAN EEN EMP

De naar buiten expanderende γ-schil produceert gedurende zijn weg door de lucht een flux van comptonelektronen. Deze comptonstroom heeft ongeveer dezelfde stijgtijd, duur en snelheid als de γ-impuls [2, 3]. Door de massale scheiding van positieve ionen en negatieve elektronen ontstaat een sterk radiaal elektrisch veld.
Voor het uitstralen van een elektromagnetisch veld is een asymmetrie in de ruimtelijke verdeling van de comptonstroom nodig. Een symmetrische γ-bron in homogene lucht zou bij afwezigheid van het aardmagnetisch veld alleen een bolvormig symmetrisch, radiaal elektrisch veld tot gevolg hebben. Er ontstaat geen magnetisch veld omdat de bolvormig symmetrisch verdeelde comptonstroom dit niet toelaat en er ontstaat geen stralings-(transversaal) veld.
Belangrijke oorzaken voor een asymmetrische verdeling van de comptonstroom en daardoor uitstraling van transversale velden zijn:

- het verschil in samenstelling van de overgang van lucht naar grond (oppervlakte explosies),
- het verschil in dichtheidsgradient van de atmosfeer (lucht explosies),
- het aardmagnetisch veld, waardoor de comptonelektronen worden afgebogen (hoge explosies).

Uit het voorgaande blijkt dat het mechanisme van het ontstaan en daarmee de eigenschappen van de EMP sterk afhankelijk zijn van de hoogte waarop de explosie plaats vindt. Men maakt in dit verband onderscheid tussen explosies in de atmosfeer en boven de atmosfeer. De grens ligt globaal op 30 km hoogte.

HET EMP-MECHANISME VAN EXPLOSIES IN DE ATMOSFEER

In fig. 2 is het mechanisme van het ontstaan van de EMP van oppervlakte explosies geschetst [3]. De naar beneden gerichte γ-straling wordt binnen een afstand van enkele meters door de grond geabsorbeerd. De rest van de γ-schil dringt echter bij een gemiddelde vrije weglengte van de fotonen van 200 m enkele kilometers diep in de atmosfeer door [4, 5]. De dunne γ-schil, die tijdens zijn weg door de lucht met de snelheid van het licht expandeert, produceert zeer veel comptonelektronen. De verplaatsing van de comptonelektronen veroorzaakt een impulsvormige comptonstroom en een radial elektrisch veld. In fig. 2 is de plaats van de γ-schil op twee achtereenvolgende momenten geschetst met daar tussenin de weg die de zeer kort durende flux van comptonelektronen volgt.

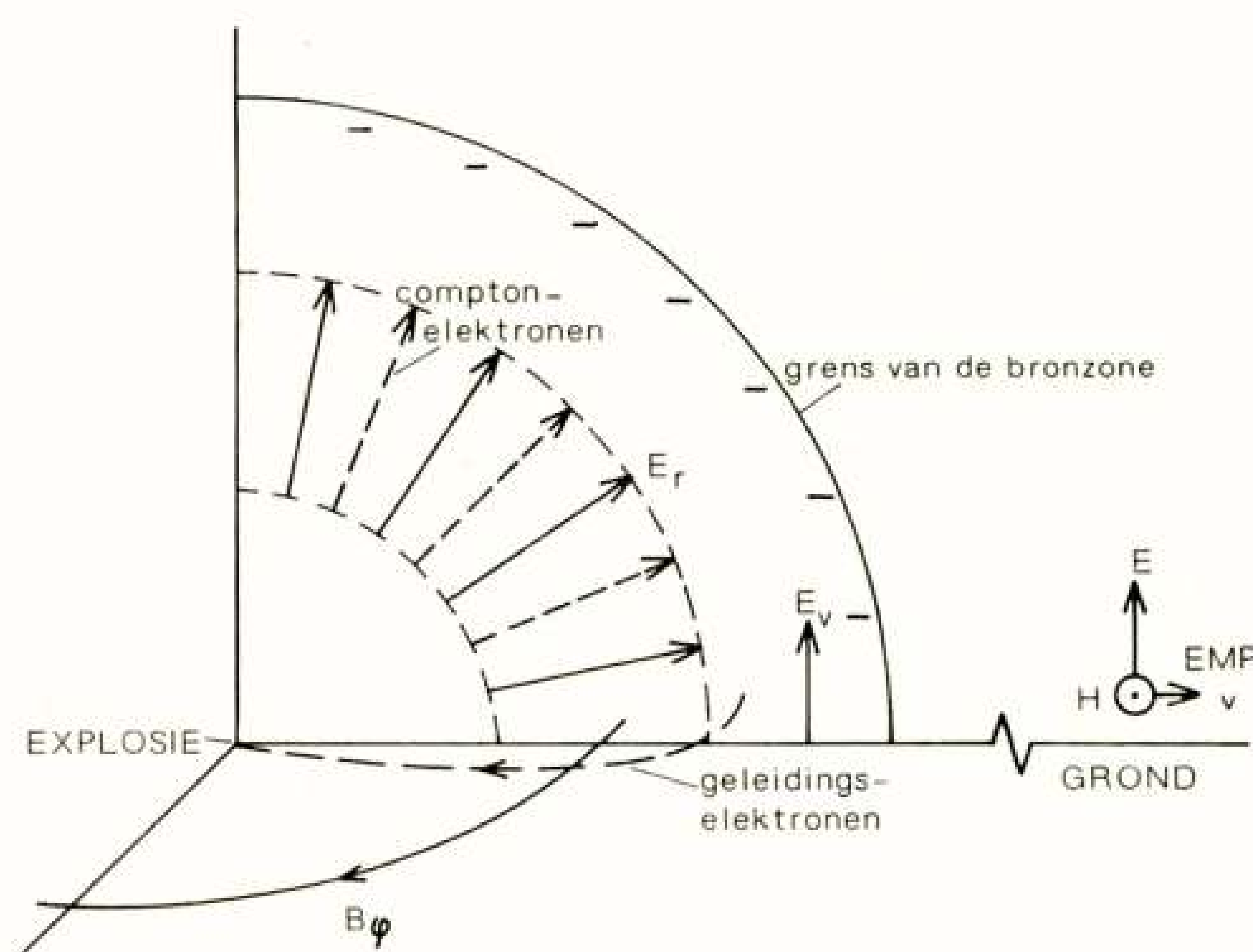


Fig. 2 Het EMP-mechanisme van oppervlakte explosies

De comptonelektronen hebben op zeeniveau een gemiddelde vrije weglengte van ca. 2 m voordat zij als gevolg van botsingen tegen luchtmoleculen hun bewegingsenergie hebben afgegeven en tot stilstand zijn gekomen. Bij de botsingen ontstaan zeer veel secondaire elektronen. Een comptonelektron met een aanvangsenergie van bijv. 1 MeV produceert ongeveer 30.000 vrije elektronen [2]. De omringende lucht raakt hierdoor sterk geïoniseerd en geleidend. De γ-schil bereikt na ongeveer 10 microseconden de grens waarbij alle energie is afgegeven. De geïoniseerde lucht heeft in dit geval de vorm van een halve bol. Dit gebied wordt de bronzone genoemd omdat hierin de EMP ontstaat. De straal van de bronzone wordt meer door de samenstelling van de lucht dan door de wapensterkte bepaald. Zij varieert bij 1 tot 1000 kT globaal tussen 1 en 5 km.
Het radiale elektrische veld, dat door de verplaatsing van de compton-(verplaatsings) elektronen gedurende het passeren van de γ-schil wordt opgebouwd, wordt door de geïoniseerde lucht in zijn piekwaarde begrensd. Er

ontstaat een evenwicht tussen de flux van de verplaatsingselektronen en de terugkerende geleidingselektronen. Dit verzadigingseffect leidt ertoe dat de maximale waarde van de piekveldsterkte begrensd wordt tot enkele honderden kilovolts per meter. Deze waarde is praktisch onafhankelijk van de wapensterkte [3].

De relatief grote geleidbaarheid van de grond, in de orde van grootte van $\sigma = 10^{-2}$ S/m of van zeewater $\sigma = 4$ S/m, veroorzaakt twee soorten van asymmetrie die het uitstralen van een veld buiten de bronzone tot gevolg hebben. Het radiale elektrische veld wordt in de omgeving van de grond kortgesloten, waardoor een vertikale (transversale) component E_v ontstaat (zie fig. 2). De geleidingselektronen zoeken vanwege de grotere geleidbaarheid van de grond bij voorkeur hun weg terug door de grond. De hierdoor veroorzaakte ringstromen hebben een azimutaal magnetisch veld tot gevolg. De magnetische fluxdichtheid B_ϕ kan een piekwaarde bereiken van enkele millitesla's, in lucht overeenkomend met een magnetische veldsterkte van enkele kilo-ampères per meter [3]. De componenten E_v en B_ϕ hebben tot gevolg dat er energie vanuit de bronzone naar buiten wordt uitgestraald. Dit is in fig. 2 schetsmatig aangegeven.

Na het bereiken van de maximale veldsterkte gedraagt de bronzone zich als een geleidende halve bol met een quasi-statisch, elektrisch dipoolmoment. De geleidingselektronen zorgen voor een min of meer geleidelijke afbouw van het veld. Op enige afstand van de bronzone heeft dit deel van de waargenomen EMP het karakter van statische dipoolvelden en stralingsvelden afkomstig van de oscillerende halve bol.

De eigenschappen van de uitgestraalde velden - de EMP **buiten** de bronzone - zijn als volgt samen te vatten. Het vertikale elektrische veld E heeft in de omgeving van de bronzone, vlak boven de grond, een piekwaarde van ongeveer 10 kV/m en neemt daarna evenredig met de afstand af. De stijgtijd heeft hier een waarde van enkele tientallen nanoseconden. Deze neemt meer dan evenredig met de afstand toe. Dit is het gevolg van de grotere voortplantingsverliezen bij hogere frequenties.

De piekwaarde wordt gevolgd door een sterk gedempte oscillatie, waarvan de eerste halve periode een duur heeft van ongeveer 10 à 25 μs [3]. De piekwaarde van de horizontale magnetische component H kan bij benadering worden berekend met $E/H = 120\,\pi$ ohm. De duur van het magnetische veld is aanmerkelijk korter dan die van het elektrische veld. De radiale component E_r is alleen in de buurt van de bronzone van belang. Deze heeft in dit gebied een veldsterkte die een orde van grootte zwakker is dan die van de vertikale elektrische component.

De EMP van oppervlakte-explosies kan schade aanrichten tot op een afstand die voor ongunstige gevallen wordt geschat op enkele tientallen kilometers. De andere nucleaire effecten zoals de windstoot, de schokgolf, de thermische en de nucleaire straling spelen eveneens een rol, zodat ook daarmee rekening moet worden gehouden.

De maximale afstand waarop de EMP van lage explosies schade veroorzaakt, is vanwege het eerder genoemde verzadigingseffect weinig afhankelijk van de wapensterkte. Hierdoor kan de EMP bij kleine wapensterkten de andere nucleaire effecten gaan overheersen.

Bij luchtexplosies, met een explosiehoogte tussen 4 en 30 km, wordt de asymmetrie in de verdeling van de comptonstroom door variaties in de luchtdichtheid veroorzaakt [1]. Deze asymmetrie is in verhouding tot die van lage of oppervlakte-explosies zeer gering, zodat ook de uitgestraalde energie aanzienlijk minder is. De effecten van luchtexplosies zijn op het aardoppervlak ondergeschikt aan die van explosies nabij het aardoppervlak. De EMP van luchtexplosies wordt daarom verder buiten beschouwing gelaten. De twee overblijvende gevallen, n.l. explosies op of vlak boven de grond en boven de atmosfeer, worden gemakshalve met lage en hoge explosies aangeduid.

Wanneer de eigenschappen van de EMP van oppervlakte-explosies, op afstanden die buiten de bronzone liggen en waar huizen en dergelijke nog net overeind blijven, worden vergeleken met die van explosies boven de atmosfeer, blijkt dat de EMP van deze laatste een kortere stijgtijd heeft, een grotere piekwaarde en een veel groter bereik, terwijl de overige nucleaire effecten te verwaarlozen zijn. De aandacht van civiele instanties is daarom in de eerste plaats gericht op de EMP van hoge explosies. Om deze reden zal ook hier wat dieper op de EMP van hoge explosies worden ingegaan.

HET EMP-MECHANISME VAN EXPLOSIES BOVEN DE ATMOSFEER

In fig. 3 is het mechanisme van het ontstaan van de EMP van hoge explosies geschetst [3]. In de getekende situatie kan het aardoppervlak als een rechte lijn worden beschouwd (de veronderstelde explosiehoogte is 80 km en de straal van de aardbol ca. 6400 km). De γ-stralen kunnen zich boven de atmosfeer vanwege de zeer geringe luchtdichtheid in alle richtingen onbelemmerd voortplanten. De intensiteit van de γ-schil neemt alleen door de vergroting van het boloppervlak af.

De gestreepte delen van de cirkels laten de positie van de γ-schil op drie achtereenvolgende momenten zien. Wanneer het naar beneden gerichte deel van de γ-schil op ongeveer 40 km hoogte aankomt, heeft de atmosfeer voldoende dichtheid verkregen om comptonelektronen te vormen. De γ-straling heeft recht onder het explosiepunt een indringdiepte van ongeveer 20 km. De verplaatsing van de comptonelektronen heeft een comptonstroom tot gevolg die op ca. 30 km hoogte zijn maximale waarde bereikt. De comptonelektronenstroom die bij zijn ontstaan evenals de γ-schil een radiale richting heeft, wordt door het aardmagnetisch veld afgebogen. Hij heeft daardoor twee componenten, nl. een radiale en een transversale component.

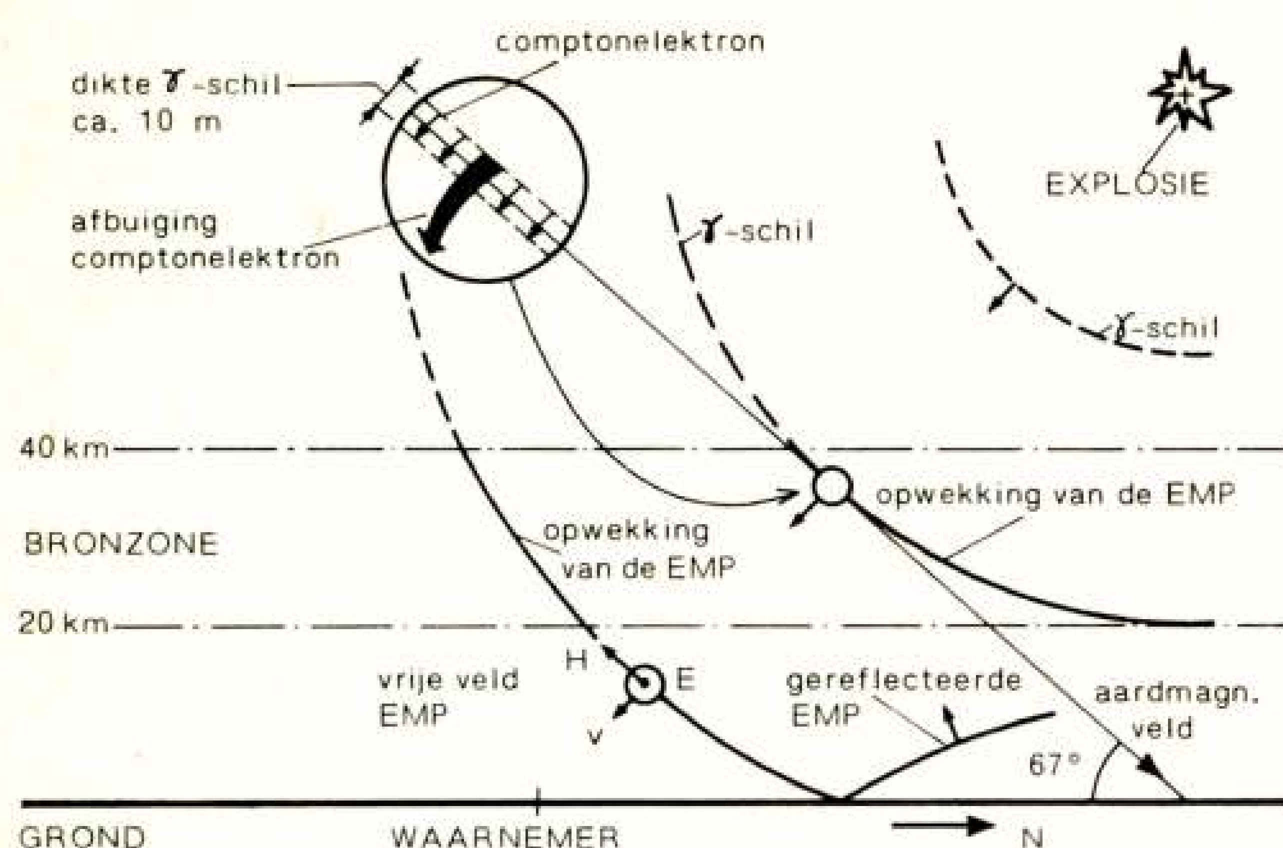


Fig. 3 Het EMP-mechanisme van hoge explosies

De component die radiaal naar buiten gericht is, heeft in de bronzone tussen 20 en 40 km hoogte een radiaal elektrisch veld tot gevolg. Een radiaal stroomelement straalt echter geen veld in radiale richting uit. Het transversale veld dat door de radiale stroom wordt uitgestraald is vanwege de geringe verstrooiing van deze stroom van weinig betekenis.

De comptonelektronen hebben in de ijle atmosfeer van grote hoogten een veel langere remweg dan op zeeniveau. De gemiddelde remweg bedraagt op 30 km hoogte ongeveer 100 m [2]. Wanneer de bewegingsrichting van de comptonelektronen een hoek vormt met de richting van het aardmagnetisch veld, worden de comptonelektronen door dit veld afgebogen. De straal van deze afbuiging, de z.g. Larmor radius, bedraagt voor een elektron met constante energie en draaiend in een vlak loodrecht op het aardmagnetisch veld, ongeveer 50 à 100 m [2]. Hierbij is aangenomen dat de magnetische fluxdichtheid in Europa tussen 40 en 60 graden noorderbreedte ongeveer 40 à 50 μT bedraagt.

De comptonelektronen doorlopen ongeveer een kwart omwenteling voordat zij volledig tot stilstand komen. De transversale comptonstroom genereert zowel naar binnen als naar buiten gaande transversale velden, die van het magnetische dipool type zijn.

Het uitgestraalde veld in de richting van de aarde heeft dezelfde richting en snelheid als de γ-schil, zodat de transversale stroom voortgaat met het opbouwen van dit transversale veld totdat het begrensd (verzadigd) wordt door de inmiddels toegenomen geleidbaarheid van de lucht of totdat de γ-straling volledig geabsorbeerd is. Dit effect is te vergelijken met dat van een phased-array antenne. De velden die dwars op de lijn tussen het explosiepunt en de waarnemer op verschillende afstanden en daardoor op verschillende tijden worden opgewekt, komen tegelijk (dus in fase) bij de waarnemer aan, waardoor een zeer sterk veld met een korte stijgtijd ontstaat. Het is dit magnetisch dipool-effect dat men bij de nucleaire testserie van 1962 boven Johnston-eiland in de Stille Oceaan over het hoofd heeft gezien en waardoor vele meetinstrumenten werden overstuurd [2]. De piekwaarde van het veld is wederom door het verzadigingseffect van de geïoniseerde lucht weinig afhankelijk van de wapensterkte.

De geïoniseerde lucht, de bronzone, heeft in dit geval de vorm van een enorme pannekoek. Deze heeft in het midden een dikte van ongeveer 20 km. Aan de randen wordt hij dunner, zie fig. 4. De diameter wordt door de hoogte van de explosie en de sterkte van het wapen bepaald. De straal is bij wapensterkten vanaf enkele honderden kilotons en een hoogte tussen 50 en 3000 km te berekenen met $R \approx 113 \sqrt{H}$. Bij een wapensterkte van bijv. 1 MT en een hoogte H = 400 km is de straal $R \approx 2260$ km.

Wanneer de wapensterkte groot genoeg is, wordt het verzadigingseffect tot in de rand van de pannekoekvormige bronzone opgewekt. Dit verklaart waarom de EMP van een hoge explosie zo'n enorm groot bereik heeft. Het opgewekte veld plant zich in het gebied onder de bronzone als een vrije golf voort. Het wordt in de regel door de grond gereflecteerd.

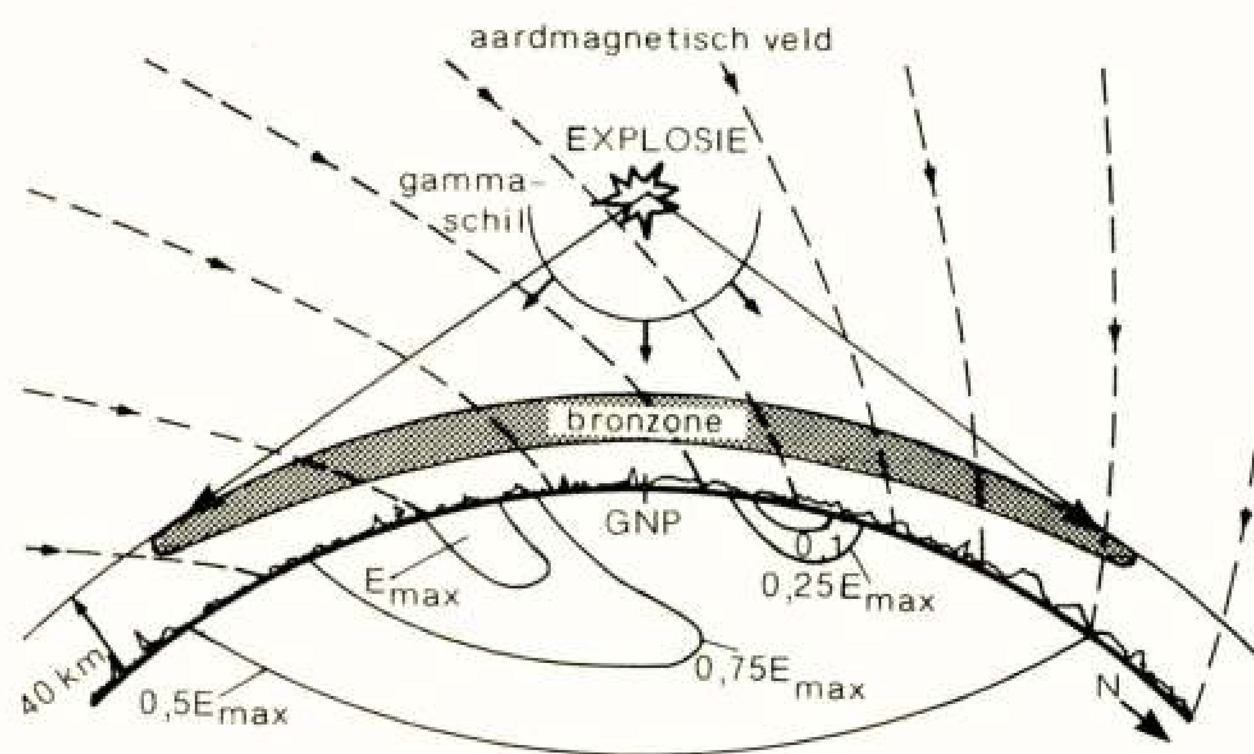


Fig. 4 De veldsterkteverschillen van hoge explosies

De EMP heeft zijn kortste stijgtijd in het grondnulpunt GNP (de loodrechte projectie van het explosiepunt op het aardoppervlak) en de langste duur onder de rand van de bronzone [4]. De EMP is sterker naarmate de comptonelektronen meer worden afgebogen, dus het aardmagnetisch veld meer loodrecht snijden, zie fig. 4.

De richting van het aardmagnetisch veld maakt in West Europa een hoek met het aardoppervlak van 67°. Dit betekent dat de piekwaarde van de EMP op een afstand 2,4 H ten zuiden van het GNP zijn maximale en op 0,4 H ten noorden van het GNP zijn minimale waarde heeft [1]. In figuur 4 is de kromming van de aarde overdreven voorgesteld om het ontstaan van veldsterkteverschillen duidelijk te kunnen weergeven.

EEN ANALYTISCH MODEL VOOR DE EMP VAN HOGE EXPLOSIES

Voor het berekenen van de responsies die door de EMP in elektrische geleiders en elektronische apparatuur worden opgewekt is het noodzakelijk de eigenschappen van de EMP te kennen. In het volgende wordt een model gegeven dat veelvuldig wordt toegepast [4]. Alhoewel het in wezen alleen voor hoge explosies geldt, dekt het in vele gevallen tevens de ongunstigste eigenschappen van de EMP van lage explosies.

Het verloop met de tijd

De kortste stijgtijd $t_r(10\%-90\%) = 5$ ns (in GNP).
De langste duur t_h (50%-50%) = 200 ns (rand bronzone).
De grootste piekwaarde $E_{pk} = 50$ kV/m en $H_{pk} = 133$ A/m (zie figuur 4).
Aangezien de plaats van de explosie niet van te voren bekend is, moet met alle drie waarden rekening worden gehouden. In plaats van met meerdere modellen te werken wordt meestal één model gebruikt, waarin de ongunstigste eigenschappen zijn gecombineerd. Een analytisch model hiervoor kan als volgt worden weergegeven:

$$E(t) = E_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \qquad (1)$$

waarin $E_0 = 5{,}3 \times 10^4$ V/m
$\alpha = 3{,}7 \times 10^6\ s^{-1}$
$\beta = 3{,}9 \times 10^8\ s^{-1}$

α is een maat voor de impulsduur, β voor de stijgtijd en E_0 voor de piekwaarde. Vanwege de grote hoogte waarop de EMP ontstaat kan het invallende veld als een vlakke golf worden beschouwd, waarvoor geldt dat E/H = 377 ohm.

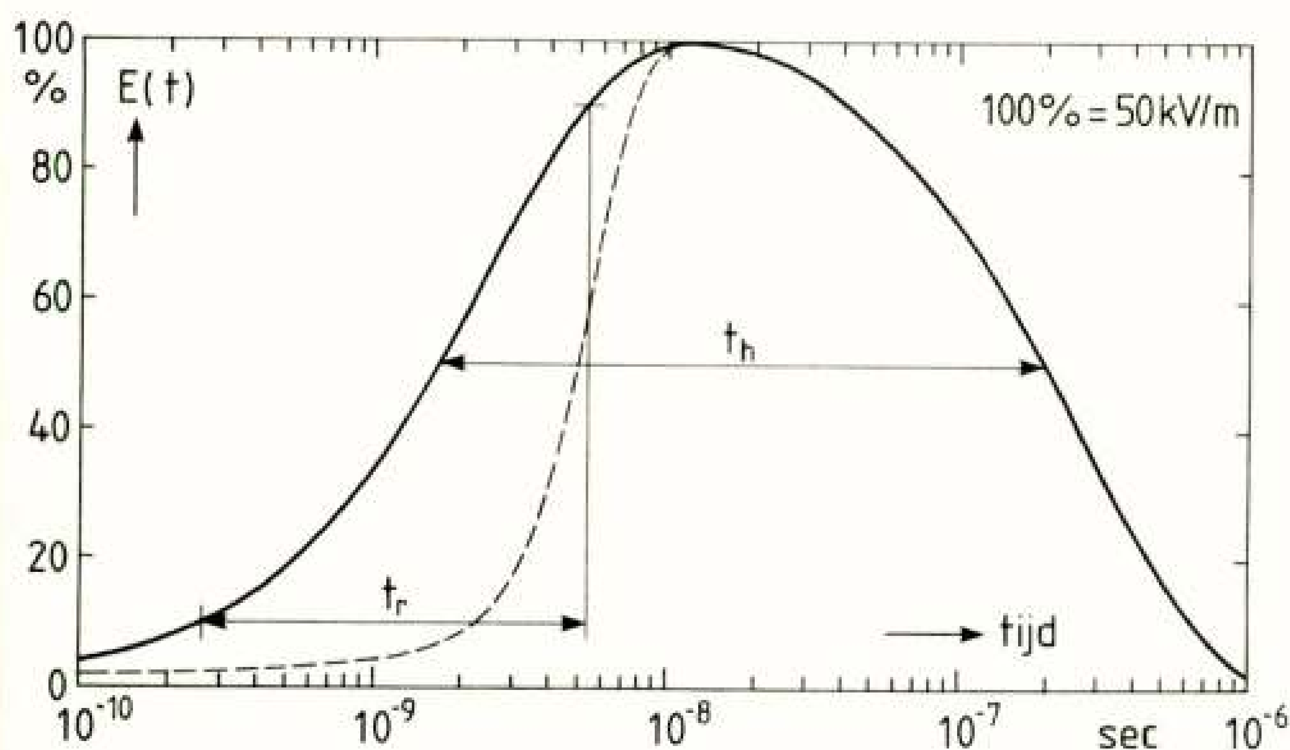


Fig. 5 Het tijdsverloop van model (1)

Met deze drie parameters zijn de belangrijkste eigenschappen van de EMP voldoende gekarakteriseerd, zie fig. 5. In werkelijkheid kan de EMP een ander verloop hebben, bijv. een kortere duur of een langere stijgtijd. Als eerste benadering voor het berekenen van de effecten op apparatuur en kabels is het gegeven model echter goed bruikbaar.

Het spectrum

Het spectrum van het model (1) kan worden berekend met:

$$E(\omega) = E_0 \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega}\right) \qquad (2)$$

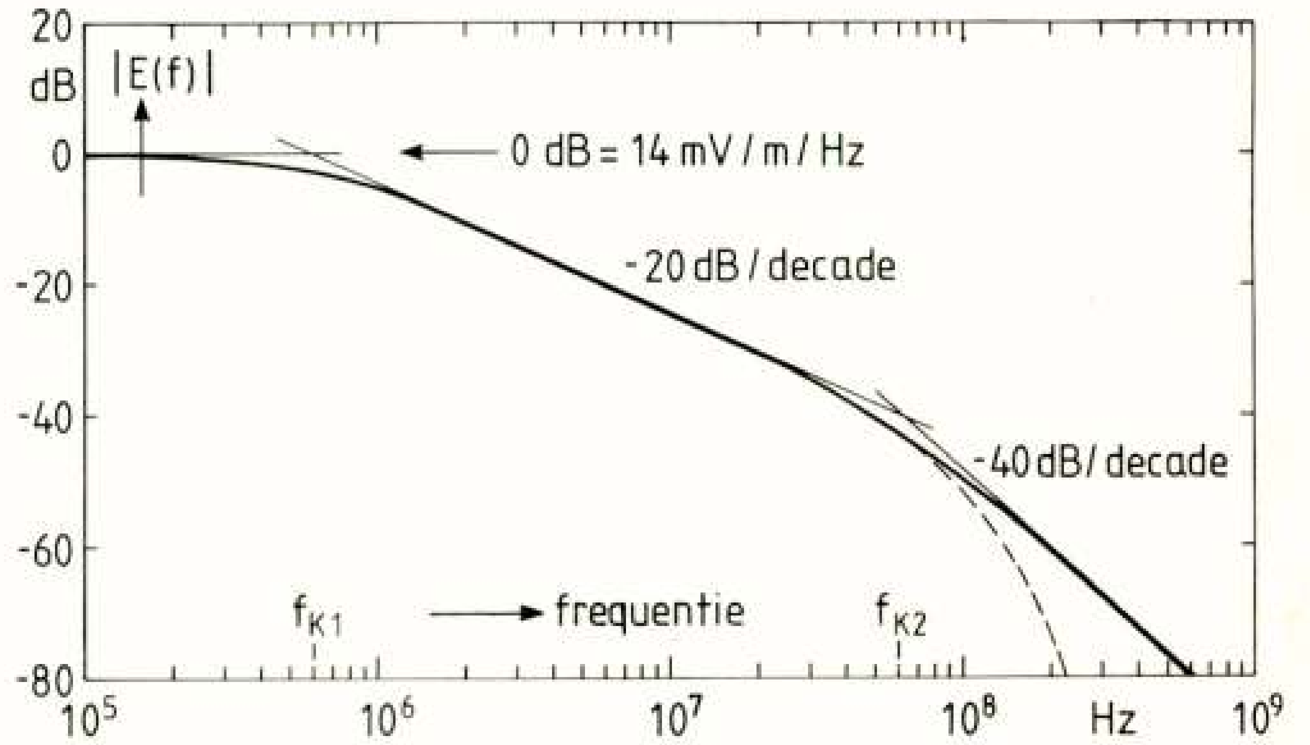


Fig. 6 Het amplitudespectrum van model (1)

In fig. 6 is de omhullende van het amplitudespectrum voor positieve frequenties gegeven. Bij $\omega = \alpha$ en $\omega = \beta$ treedt een kantelpunt op. Het spectrum van een werkelijke EMP neemt vanwege zijn zwak oscillerend verloop vanaf ca. 25 kHz naar lagere frequenties met 20 dB per decade af [6, 7]. Dit heeft voor de berekeningen echter weinig consequenties omdat de koppeling van geleiders met de laagfrequente componenten van het spectrum vanwege de relatief korte lengte van deze geleiders zeer gering is. Het model (1) bevat een discontinuïteit ten tijde t = 0, die de EMP waarschijnlijk niet zal hebben en die ook moeilijk te simuleren is. Wanneer E(t) in fig. 5 i.p.v. een exponentiële een geleidelijke stijging wordt gegeven, waarbij de stijgtijd van 5 ns behouden blijft (zie de gestreepte curve), blijkt het spectrum in fig. 6 het gestreepte verloop aan te nemen. Het model (1) is dus ook in dit opzicht aan de ongunstige kant [3].

De energiedichtheid

De energiedichtheid is de hoeveelheid energie die door een oppervlak van 1 m^2 loodrecht op de stralingsrichting passeert. De totale energiedichtheid volgt uit:

$$S_T = \frac{1}{120\pi} \int_0^\infty E^2(t)\, dt \qquad (3)$$

en bedraagt ca. 1 J/m^2. De energiedichtheid in een bepaalde frequentieband kan worden berekend met:

$$S = \frac{1}{120\,\pi^2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} |E(\omega)|^2 d\,\omega \qquad (4)$$

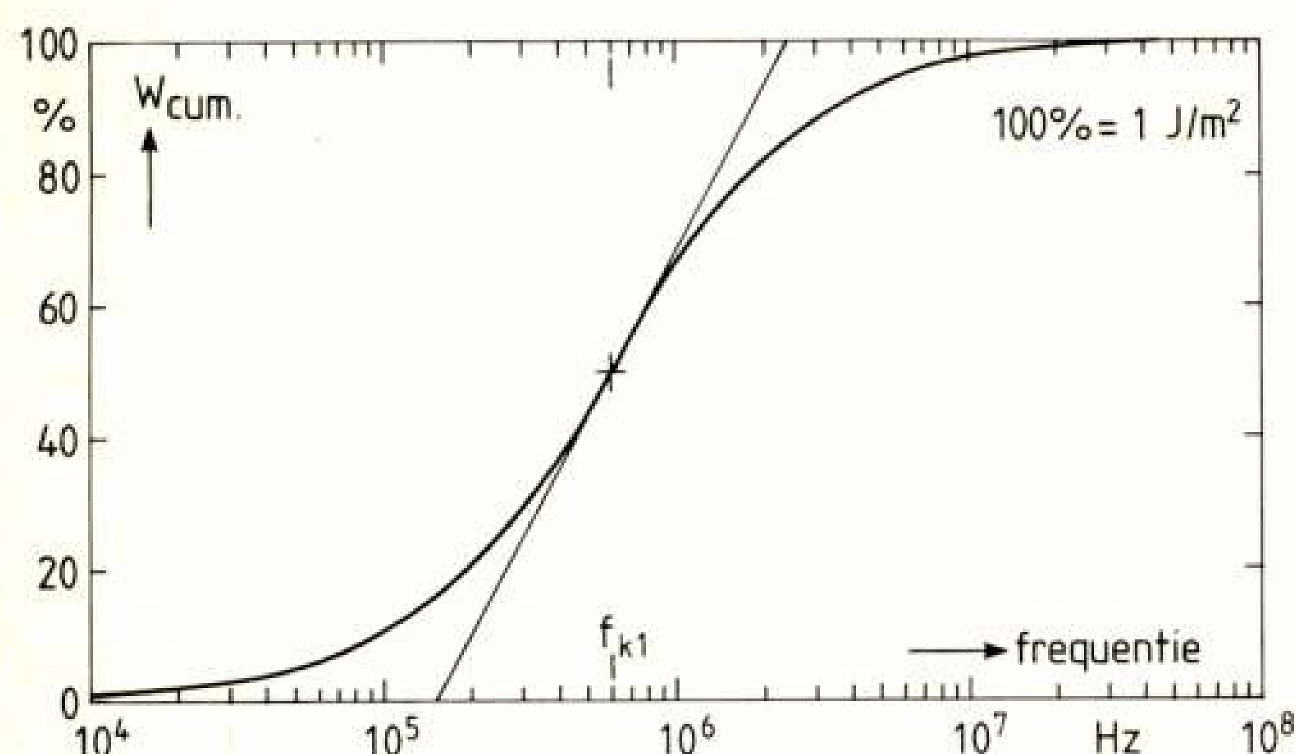


Fig. 7 De cumulatieve energiedichtheid van model (1)

De cumulatieve energiedichtheid kan worden afgelezen uit fig. 7. Hieruit blijkt dat 95% van de totale energiedichtheid aanwezig is in de band van 0 tot 6 MHz. In vele gevallen zorgen echter juist de hogere frequenties voor een effectieve koppeling (zie fig. 10 en de voorbeelden in het volgende hoofdstuk). De energiedichtheid van 0,05 J/m^2 die boven 6 MHz overblijft is nog ruim voldoende om schade in elektronische systemen te veroorzaken (zie fig. 11).

De polarisatie

De polarisatie van de EMP geeft de richting van de elektrische component van het veld aan. Als vuistregel geldt dat de richting van het elektrische veld loodrecht op de voortplantingsrichting en op het aardmagnetisch veld ter plaatse staat, zie fig. 3 en 4. Dit betekent dat bij explosies ten noorden of ten zuiden van ons land de polarisatie horizontaal is. Voor explosies die ver ten oosten en ten westen van onze grenzen plaats vinden is de maximale afwijking van de horizontale richting 23°. De vertikale component bedraagt dan maximaal 10 à 15 kV/m [4].

Reflecties aan de grond

Bovenstaande gegevens hebben betrekking op het invallende veld. De EMP wordt in de regel door de grond gereflecteerd, waarbij de polariteit van het overwegend horizontaal gepolariseerde veld wordt omgekeerd. Door de omgekeerde polariteit van de gereflecteerde golf en het weglengteverschil tussen de directe en de gereflecteerde golf heeft het resulterende veld een andere vorm dan de EMP. De resulterende golfvorm is meestal smaller dan die van het invallende veld en heeft bij kleine weglengteverschillen bovendien een kleinere piekwaarde. Een en ander is afhankelijk van de elektrische eigenschappen van de bodem, de hoek van inval en de hoogte van het beschouwde object boven de grond.

DE EFFECTEN VAN DE EMP

De effecten van de EMP op elektrische en elektronische systemen zijn afhankelijk van vier factoren, n.l.:

- de eigenschappen van de EMP ter plaatste,
- de koppeling van het systeem met de EMP,
- de overdracht van de geïnduceerde responsies naar de componenten,
- de kwetsbaarheid en gevoeligheid van deze componenten.

KOPPELING MET DE EMP

Ter illustratie twee eenvoudige voorbeelden van de koppeling met de elektrische of magnetische component van het veld.

Voorbeeld 1, het elektrische veld.

Een niet afgeschermde draad boven een geaard vlak is met een vertikaal gepolariseerde EMP gekoppeld. Tussen de draad en het aardvlak is een weerstand R aanwezig.

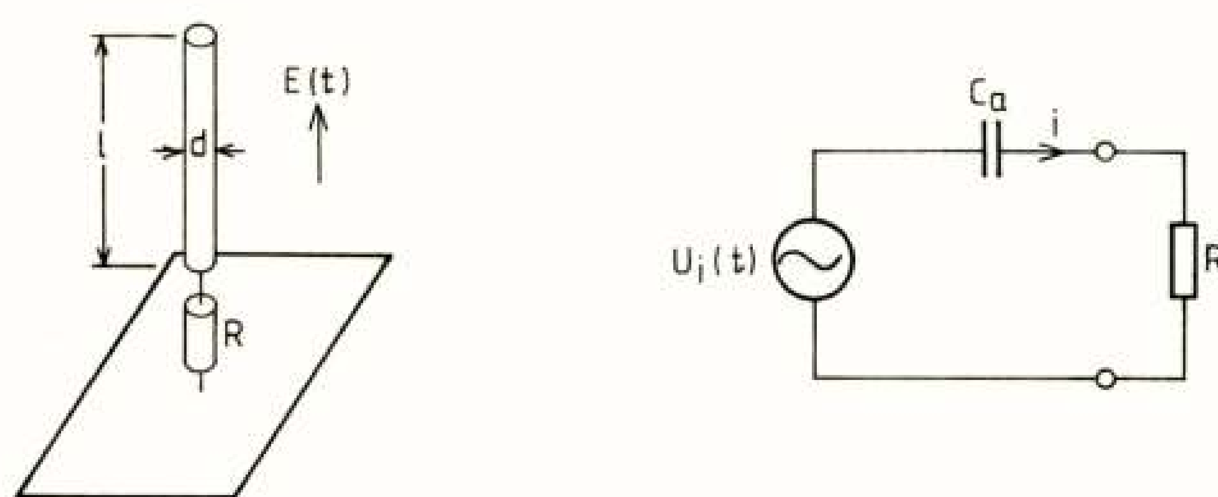


Fig. 8 Koppeling met het elektrische veld

In fig. 8 is de situatie met het vervangingsschema getekend, waarin $U_i(t)$ de geïnduceerde spanning in de draad is en C_a de capaciteit die de draad t.o.v. het aardvlak heeft. Aangenomen wordt dat voor het beschouwde frequentiegebied $l \ll \lambda$ en $1/\omega C_a \gg R$. Dan geldt dat

$$U_i(t) = \frac{1}{2} E(t) \qquad (5)$$

en

$$i(t) = C_a \frac{dU_i(t)}{dt} = \frac{C_a l}{2} \frac{dE(t)}{dt} \qquad (6)$$

Voor een draad met een lengte l = 1 m en dikte d = 1 mm is de antennecapaciteit C_a ongeveer 8 pF. Deze is bij benadering evenredig met l. Wanneer de vorm van E(t) voor het gemak vervangen wordt door een driehoek met een stijgtijd van 10 ns, afvaltijd 1 µs en piekwaarde van 50 kV/m, blijkt dat de stroom een piekwaarde van 20 A heeft. Dit veroorzaakt een piekspanning over een weerstand R = 50 Ω van 1000 V. Gedurende de stijgtijd wordt

in R een hoeveelheid energie $W = i^2Rt$ gedissipieerd van 2×10^{-4} J. De bijdrage afkomstig van de afvaltijd is te verwaarlozen. Wanneer de weerstand R in fig. 8 wordt vervangen door een gevoelige halfgeleider, zijn zowel de spanning als de toegeleverde energie, voldoende om deze halfgeleider te beschadigen (zie fig. 11).

Voorbeeld 2, het magnetische veld.
Een lus met oppervlak O is maximaal gekoppeld met de magnetische component van de EMP uit het vorige voorbeeld, waarvan H_{pk} = 133 A/m. De lus is afgesloten met een weerstand R.

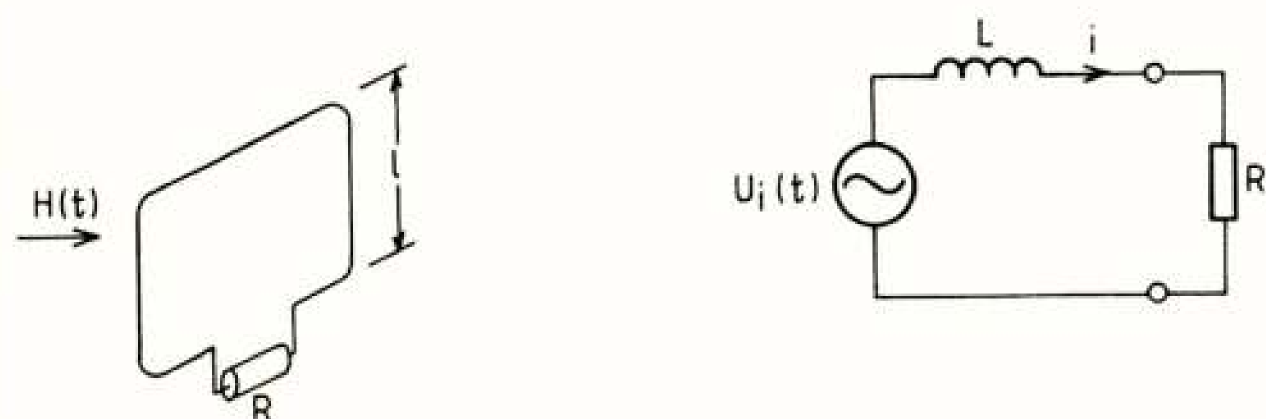


Fig. 9 Koppeling met het magnetische veld

Fig. 9 geeft de situatie met het vervangingsschema, waarin L de zelfinductie van de vierkante lus is en $U_i(t)$ de spanning die in de lus wordt geïnduceerd. Wanneer de afmetingen van de lus klein zijn t.o.v. de golflengte van het beschouwde frequentiegebied en $\omega L \ll R$ dan geldt:

$$U_i(t) = \mu \, O \, \frac{dH(t)}{dt} \tag{7}$$

en

$$i(t) = \frac{U_i(t)}{R} = \frac{\mu \, O}{R} \, \frac{dH(t)}{dt} \tag{8}$$

Voor een lus met l = 1 m heeft L een waarde van ca. 2,5 μH. Met een R = 20 k Ω is de piekstroom i_{pk} = 0,84 A. Over de weerstand R ontstaat een piekspanning van 16,7 kV. In R wordt gedurende de stijgtijd een hoeveelheid energie gedissipieerd van $1,4 \times 10^{-4}$ J. Hiervoor geldt hetzelfde als in het vorige voorbeeld gesteld.

De lengte van de geleiders
Uit (6) en (8) volgt dat de spanning over de weerstand R evenredig is met de eerste afgeleide van het veld. De dreiging die van de EMP uitgaat schuilt in de extreem hoge waarden van dE/dt en dH/dt. Het spectrum van de eerste afgeleide van het veld geeft daarom een beter beeld hoe de koppeling met vooral elektrisch korte geleiders tot stand komt, zie fig. 10. De spectrale amplitude heeft tot ruim 100 MHz een hoge waarde. Vergelijk fig. 10 met fig. 6.

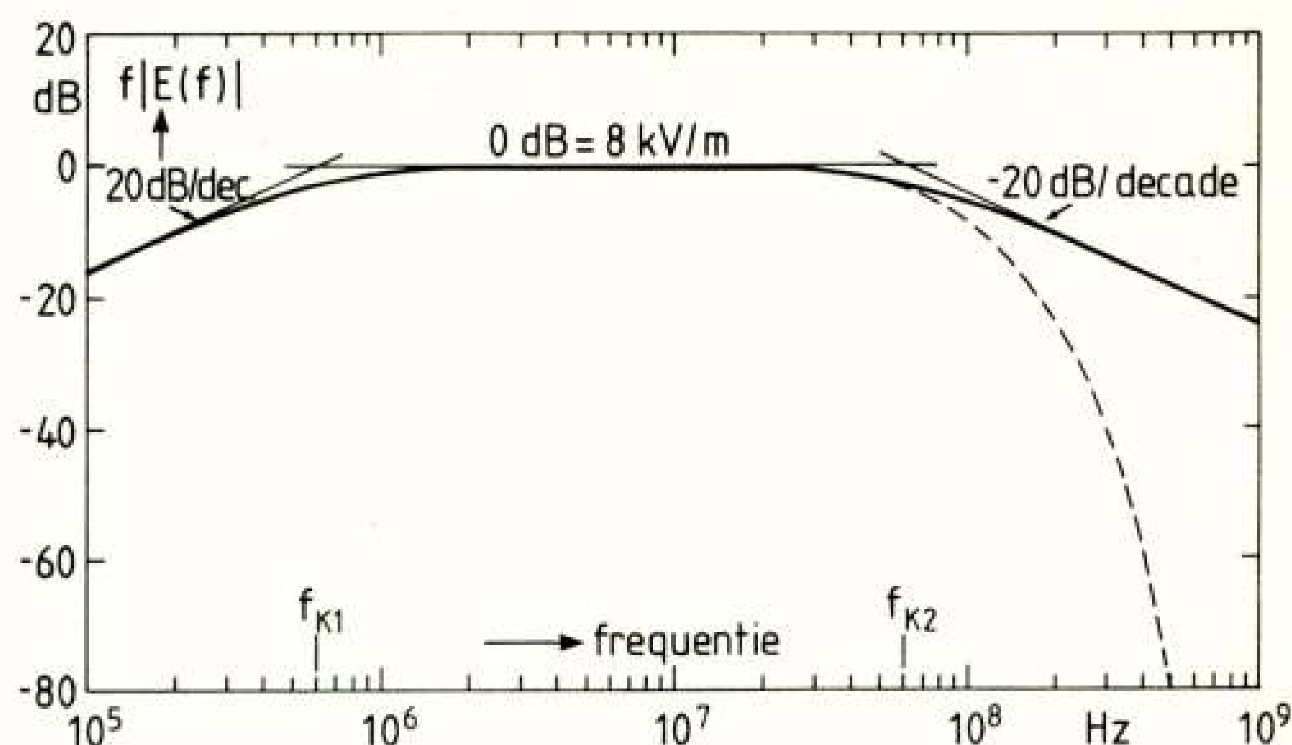


Fig. 10 Het amplitudespectrum van dE(t)/dt, model (1)

Alhoewel voor grotere afmetingen van de draden en lussen meer gecompliceerde berekeningen nodig zijn, is ook al met (6) t/m (8) in te zien dat de gedissipieerde energie in R aanvankelijk met ongeveer de vierde macht van de afmetingen toeneemt. In bovengrondse geleiders met een lengte van enkele honderden meters wordt de geïnduceerde energie op 10^4 J geschat. Bij nog grotere lengte neemt de geïnduceerde stroom nog maar weinig toe en veroorzaakt de bijbehorende piekspanning doorslag of overslag naar de omgeving.

De koppeling van de EMP met de apparatuur zélf is bij beperkte afmetingen van bijv. 1 m niet erg sterk. De dikwijls reeds aanwezige metalen kast biedt in de regel voldoende afscherming. De apparatuur is echter veelal verbonden met externe geleiders zoals een netsnoer, een hulpapparaat of een antenne. Het zijn de gevoelige componenten die met dergelijke geleiders zijn verbonden die de zwakke plekken in het systeem vormen. Zo blijkt een draagbare batterij ontvanger met uitgeschoven staafantenne, die in het FM bereik is afgestemd, kwetsbaar voor de EMP van model (1) te zijn. De overdracht van de geïnduceerde energie is echter in vele gevallen veel minder optimaal dan in het gegeven voorbeeld.

KWETSBAARHEID VOOR EMP

Van de componenten die in elektrische en elektronische systemen worden toegepast zijn de halfgeleiders het meest kwetsbaar voor EMP. Deze zijn zeer gevoelig voor piekspanningen, vooral in sperrichting omdat hierbij de grootste spanningsval over de junctie ontstaat. Als gevolg van het bereiken van de z.g. "avalanche breakdown voltage" ontstaat via een soort sneeuwbaleffect een plotselinge stroomtoename, die op zichzelf niet destructief behoeft te zijn. Door de korte stijgtijd van de spanningspiek gebeurt dit echter zo snel dat de stroom zich niet over het gehele scheidingsvlak gelijkelijk kan verdelen, waardoor plaatselijk een te grote warmteontwikkeling ontstaat. Dit effect is in de literatuur bekend onder de naam "second breakdown". Het is de meest

voorkomende oorzaak voor het ontstaan van defecten in halfgeleiders [4, 5]. De breakdown voltage van IC's ligt globaal tussen 0,6 en 30 V.

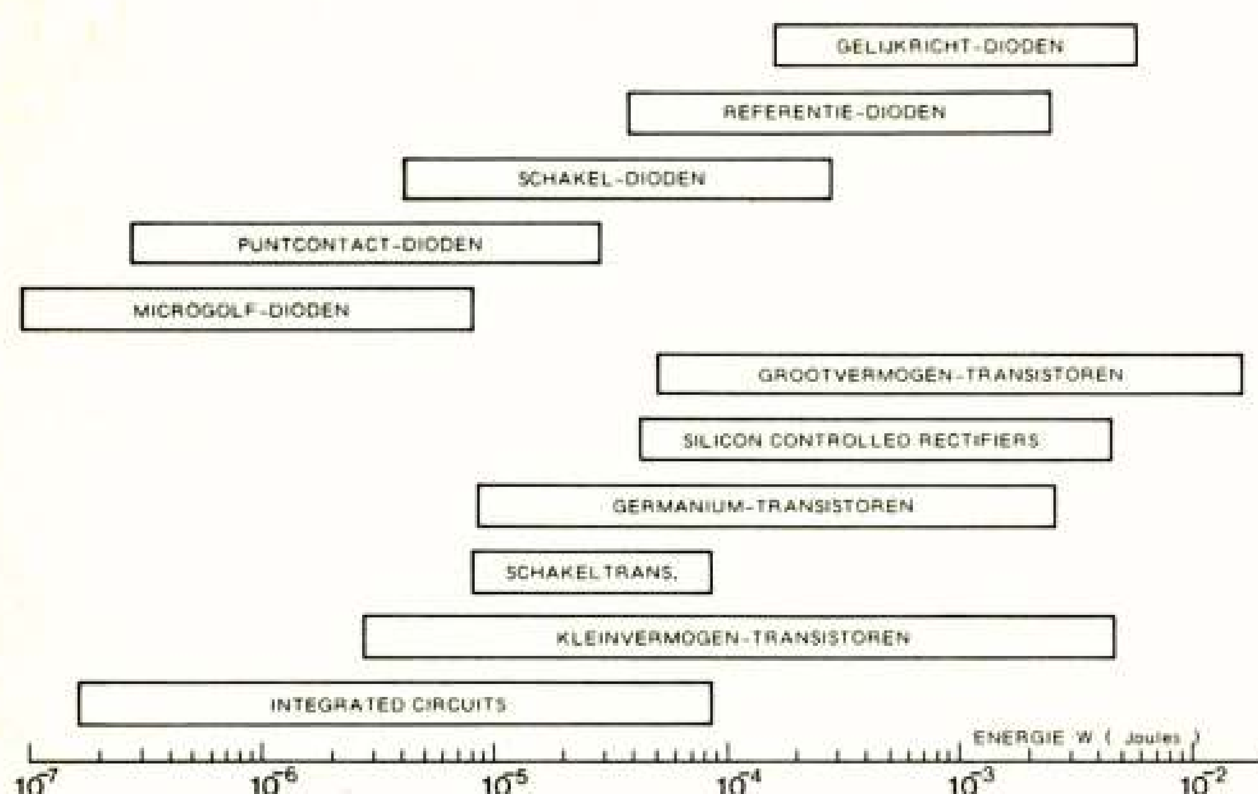


Fig. 11 Vergelijking van het kwetsbaarheidsniveau van enkele soorten halfgeleiders

Behalve de stijgtijd en de piekwaarde is ook de duur van de spanning, resp. de stroom van belang. Daarom wordt meestal de energie vermeld die minimaal moet worden toegevoerd voordat beschadiging optreedt. Deze is voor verschillende soorten halfgeleiders in fig. 11 opgenomen [4]. De waarden van W gelden voor een adiabatische energietoevoer die de vorm heeft van een rechthoekige impuls en een duur $t < 100$ ns. Voor een langere duur neemt W evenredig met $\sqrt{t}$ toe. Dus voor een $t = 10$ μs ligt het kwetsbaarheidsniveau van bijv. schakeltransistoren globaal tussen 10^{-4} en 10^{-3} joule.

De responsies in geleiders hebben meestal de vorm van een gedempte sinus, waarvan de frequentie f door de lengte van de geleider wordt bepaald. Deze responsies blijken in de praktijk ongeveer hetzelfde effect te hebben als een rechthoekige impuls met een duur $t = \frac{1}{2,4\ f}$.

Uit de figuur blijkt verder dat de kwetsbaarheid toeneemt naarmate het oppervlak van de junctie afneemt. Kleine oppervlakken gaan meestal samen met het verwerken van hoge frequenties. De spreiding in W hangt nauw samen met de afmetingen van de betreffende halfgeleider in de aangegeven groep. In fig. 11 is de stand van zaken van omstreeks 1975 weergegeven. De meer moderne IC-technieken hebben inmiddels tot een grotere pakkingsdichtheid en een lagere dissipatie van de chips geleid. Het is de vraag of bij de ontwikkeling van deze chips rekening is gehouden met de verhoogde gevoeligheid voor kort durende piekspanningen.

De meeste fabrikanten van halfgeleiders vermelden geen energieniveau's waarbij schade als gevolg van EMP verwacht kan worden. Een veel gebruikte methode om deze niveau's te berekenen is die m.b.v. het thermische model van Wunsch [4, 5]. Behalve het secondary breakdown mechanisme in p-n juncties zijn er nog andere oorzaken voor beschadiging van halfgeleiders, doch deze komen minder veelvuldig voor of treden bij hogere energieniveau's op.

Andere, minder kwetsbare componenten zijn dunne film weerstanden (kool, metaal of oxyde), condensatoren met een kleine capaciteit en lage werkspanning en kleine spoelen met een grote zelfinductie. Relais, zekeringen en transformatoren worden soms beschadigd doordat via lange leidingen veel energie wordt toegevoerd.

GEVOELIGHEID VOOR EMP

Bij het beschouwen van de effecten van de EMP moet onderscheid worden gemaakt tussen verstoring en beschadiging van de apparatuur. Verstoring draagt een tijdelijk en beschadiging een permanent karakter. Ook verstoring kan grote gevolgen hebben zoals het uitvallen van een elektriciteitscentrale door ontregeling van de computer die de belasting automatisch aanpast.

Voor geheugenuitwissing in het RAM-gedeelte van computers is slechts 10^{-9} tot 10^{-7} J nodig (RAM = random access memory). Deze hoeveelheid kan reeds door de interne bedrading van de computer worden opgevangen. De enige remedie hiertegen is het afschermen van de computer.

Informatie opgeslagen op computerbanden is niet gevoelig voor de EMP [4]. Voor verstoring is een magnetische fluxdichtheid van enkele tientallen mT nodig, in lucht overeenkomend met een magnetische veldsterkte van enkele tienduizenden ampères per meter. De piekveldsterkte van de hoge explosie is 133 A/m. De magnetische fluxdichtheid in de bronzone van lage explosies wordt hier buiten beschouwing gelaten, omdat voor civiele objecten de andere nucleaire effecten in dit gebied overheersen.

Verder kunnen ook verstoringen in digitale schakelingen gevolgen hebben, zoals het foutieve of voortijdige in- of uitschakelen van een regel- besturings- of beveiligingscircuit. Verstoringen in geïntegreerde circuits (IC's) kunnen reeds bij piekspanningen van enkele volts optreden. Hierbij is ook de duur van de spanning van belang.

BESCHERMING TEGEN EMP

De mate van bescherming is behalve van de gevoeligheid van de gebruikte schakelingen en de kwetsbaarheid van de toegepaste componenten sterk afhankelijk van de afmetingen van de apparatuur en van de lengte van de hiermee verbonden uitwendige geleiders.

Bij kleine apparatuur, zoals een TV-toestel kan meestal worden volstaan met het aanbrengen van spanningsbegrenzers of stroomafleiders op de plaatsen waar de geleiders zoals het netsnoer en de antenne het apparaat binnen komen [8, 9].

Bij grotere apparatuur moet ook aandacht aan de afscherming van het apparaat besteed worden. In veel gevallen kan hiervoor de reeds aanwezige metalen kast benut worden.

Bij complexe systemen zoals grote computers kan het voordeel hebben om de ruimte waarin de computer met zijn

randapparatuur is opgesteld van een afschermende omhulling te voorzien en alleen de kabels die de afgeschermde ruimte in- en uitgaan van begrenzers te voorzien.
Bij reeds bestaande, omvangrijke systemen kan het ontwerpen en aanbrengen van een afdoende bescherming grote problemen opleveren en hoge kosten tot gevolg hebben.

De algemene beschermingstechnieken, die uit de bestrijding van radiostoring bekend zijn, zoals het verminderen van de inkoppeling via de bedrading, de bekabeling of het aardingssysteem, zijn ook voor EMP toepasbaar. Daarom zal hier alleen op de afscherming van ruimten en de toepassing van begrenzers worden ingegaan.

Afscherming

Het oude concept van het vervangen van een afschermende omhulling door een oneindig grote en vlakke plaat en het berekenen van de absorptie- en reflectiedemping hiervan is voor EMP doeleinden niet bruikbaar. De vorm en de afmetingen van de omhulling worden n.l. verwaarloosd, het levert veel te optimistische resultaten bij lage frequenties op en het geeft geen enkele relatie tussen de dreiging buiten en de responsie binnen de omhulling.
Wat nodig is voor het ontwerpen van een effectieve afscherming is niet de demping van een vlakke plaat bij een aantal frequenties, maar het verloop met de tijd van het veld binnen de omhulling met zijn specifieke vorm en afmetingen. Er zijn methoden waarmee het veld binnen een gesloten metalen omhulling berekend of uit grafieken afgelezen kan worden [7, 10, 11]. Wanneer hiermee de keuze van de materiaalsoort en de materiaaldikte is vastgelegd, behoeft alleen nog maar aandacht besteed te worden aan de las- of soldeernaden en het elektrisch dicht maken van de noodzakelijke onderbrekingen in de gesloten omhulling, zoals deuren, ventilatie-openingen, enz.

Zoals eerder aangetoond, wordt de grote piekwaarde van de geïnduceerde responsies in geleiders veroorzaakt door de uitzonderlijk hoge waarden van dE/dt en dH/dt. Dit verschijnsel, dat de EMP zo gevaarlijk maakt, heeft bij afscherming juist het omgekeerde effect. De demping van een gesloten metalen omhulling neemt namelijk zeer sterk toe naarmate de frequentie hoger wordt. Dit heeft tot gevolg dat niet alleen de amplitude van het inwendige veld afneemt, maar bovendien de stijgtijd zeer veel groter wordt. Het mes snijdt dus als het ware aan twee kanten. In de praktijk is aangetoond dat koper en blik met een dikte van resp. 0,5 en 0,3 mm meer dan voldoende afscherming tegen de EMP van hoge explosies biedt. De geïnduceerde piekspanning in lussen ligt in dit geval in de orde van grootte van 1 mV/m^2 [11]. De afscherming tegen de elektrische component van het veld is hiermee eveneens gewaarborgd. Dikker materiaal wordt alleen uit mechanische overwegingen gekozen, bijv. voor de stevigheid of als reserve tegen mogelijke corrosie. Er behoeven geen bijzondere eisen aan de elektrische eigenschappen van het materiaal gesteld te worden. Het effect van de sterke toename van de stijgtijd wordt geheel of gedeeltelijk teniet gedaan, wanneer het elektrisch dichtmaken van de naden of de noodzakelijke onderbrekingen in de omhulling zoals deuren, niet met de uiterste zorg wordt uitgevoerd. Het compenseren hiervan door beter of dikker materiaal voor de afscherming te gebruiken heeft geen enkele zin.

Begrenzers

Wanneer het elektrisch dicht maken van de afschermende omhulling voltooid is, zullen vervolgens de geleiders die de omhulling in- en uitgaan van ongewenste signalen moeten worden ontdaan. De mate hiervan is afhankelijk van de eis of de apparatuur niet beschadigd of bovendien niet verstoord mag worden. Voor het beschermen tegen hoge piekspanningen en piekstromen zijn speciale begrenzers in de handel.

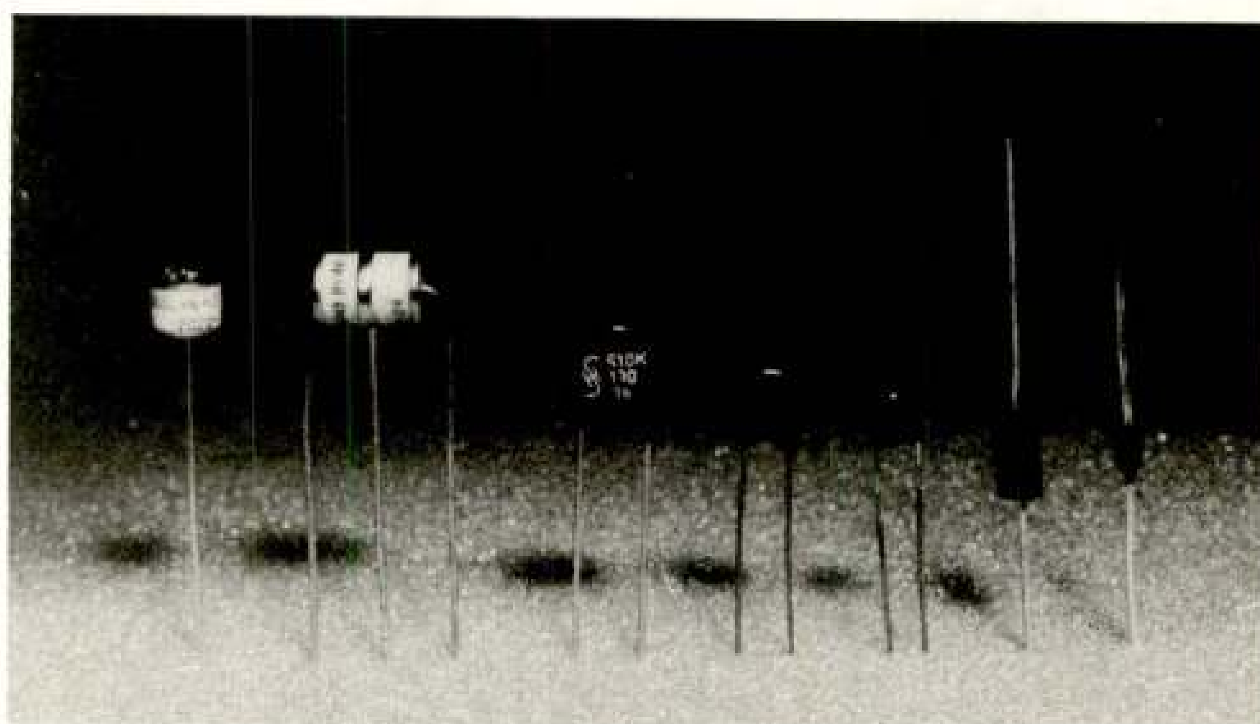


Fig. 12 Drie soorten EMP begrenzers (vonkbruggen, MOV's en dioden)

Fig. 12 toont enkele kleine typen zoals die in apparatuur worden aangebracht. Het zijn, van links naar rechts en in volgorde van afnemende energie-absorptie: (gasgevulde) vonkbruggen, metaal-oxyde-varistors en speciale beveiligingsdioden. Elk type heeft zijn specifieke voor- en nadelen, doch alle hebben gemeen dat zij zeer snel reageren [8]. Dit geldt voor het element zélf. De zelfinductie van de aansluitdraden kan n.l. overshoot veroorzaken. Door combinaties te vormen en aanvullende componenten te gebruiken, zoals spoeltjes en serieweerstanden, kunnen de resultaten voor een specifiek geval worden geoptimaliseerd. De begrenzers mogen overigens gaan nadelige invloed op de normale werking van de apparatuur uitoefenen. Het is bij de bescherming tegen EMP gebruikelijk vanwege de vele onzekerheden een veiligheidsfactor van 20 dB aan te houden.
Afgeschermde ruimten die met lange bovengrondse leidingen zijn verbonden, behoren met begrenzers van zwaarder kaliber voorzien te worden. Vonkbruggen die voor bliksembeveiliging worden toegepast zijn meestal trager en daardoor niet altijd geschikt voor EMP. Hierbij moet bedacht worden dat de stijgtijd van de responsies op geleiders

met een lengte vanaf bijv. enkele tientallen meters aanzienlijk groter is dan die van de EMP.
Begrenzers zijn niet-lineaire elementen. Zij zijn niet geschikt om breedband stoorsignalen tot in het mV-bereik te onderdrukken. Filters zijn daarentegen niet geschikt om hoge piekspanningen te begrenzen. Wanneer zowel tegen bliksemverschijnselen, EMP en radiostoring maatregelen nodig zijn is de juiste volgorde van buitenaf gezien: bliksembeveiliging, EMP begrenzers en filters.

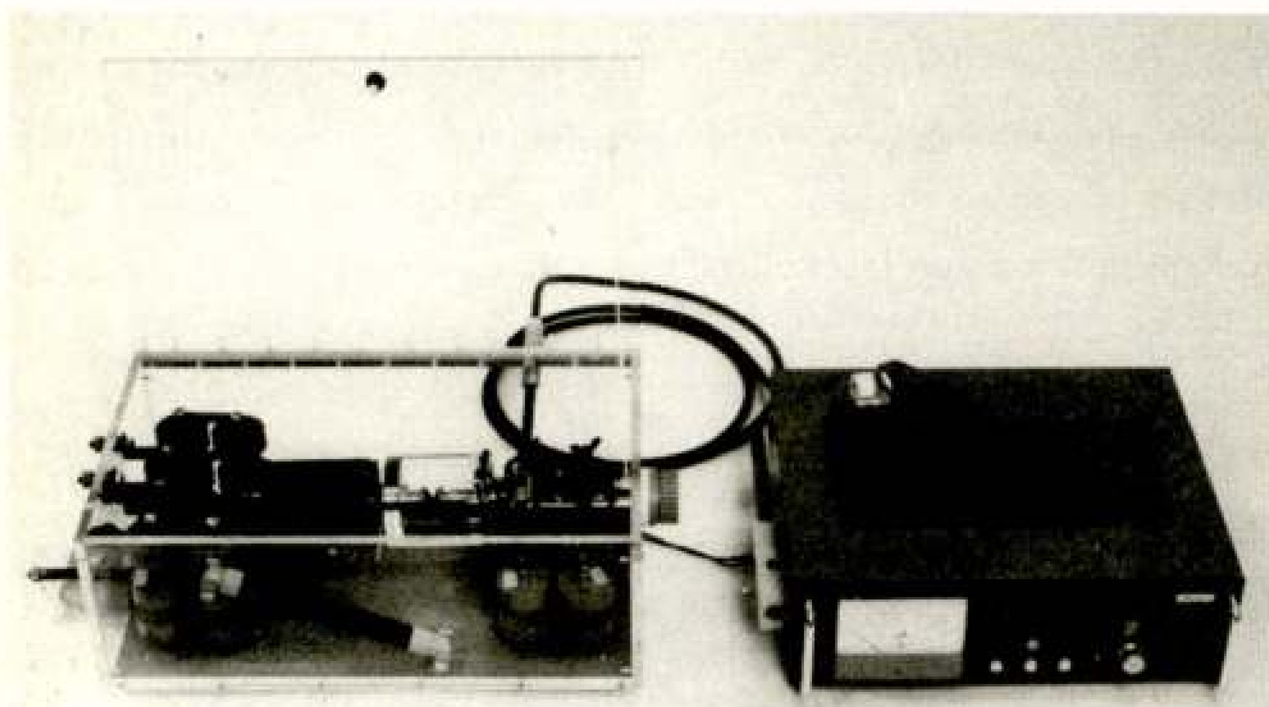


Fig. 13 Een signaal-injectie-generator (max. 50 kV)

De noodzaak voor het aanbrengen van de begrenzers en de effectiviteit hiervan kunnen worden vastgesteld door de stromen en spanningen die op de ingang van de apparatuur verwacht worden d.m.v. een signaal-injectie-generator toe te voeren, zie fig. 13.
Een andere mogelijkheid is de kabels die naar de apparatuur voeren over hun gehele lengte aan een gesimuleerde EMP bloot te stellen. Hiervoor zijn grote EMP-simulatoren nodig [8, 9].

CONCLUSIES

- De EMP vormt een ernstige bedreiging voor elektrische en elektronische systemen, enerzijds vanwege de energie waarmee dit verschijnsel gepaard gaat en het grote geografische bereik, anderzijds door de kwetsbaarheid van de moderne elektronica voor kort durende stroom- en spanningspieken.
- De EMP van een nucleaire explosie op bijv. 400 km hoogte kan het openbare leven over een heel continent op praktisch hetzelfde moment ernstig ontregelen zonder dat de andere nucleaire effecten merkbaar zijn.
- Bescherming tegen EMP is technisch mogelijk. Zij is voor kleine apparatuur eenvoudig uit te voeren. Voor bestaande omvangrijke systemen kan bescherming grote problemen opleveren, ook wat betreft het instandhouden hiervan.
- De beste, meest effectieve en goedkoopste wijze van beschermen wordt verkregen door reeds bij het ontwerpen van de apparatuur en bij het bouwen en installeren van het onderkomen met EMP rekening te houden.

LITERATUUR

[1] Glasstone, S. and Dolan, P.J., The Effects of Nuclear Weapons; third edition 1979, Department of Defence and Department of Energy, Washington DC, TDCK 71199.

[2] Longmire, C.L., On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions; IEEE, vol. AP-26, no. 1, Jan. 1978.

[3] Longmire, C.L., EMP Environments from Surface and High-Altitude Nuclear Explosions; EMC Symposium Record, Rotterdam, April 1979.

[4] EMP Engineering and Design Principles, 1975; Bell Laboratories, Technical Publication Department, Whippany, New Jersey, TDCK 77282.

[5] DNA EMP Awareness Course Notes, second edition, Sept. 1973; IIT Research Institute, Chicago, Illinois, AD-769781, TDCK 85879.

[6] EMP Protection for Emergency Operating Centers, TR 61-A, July 1972; Defense Civil Preparedness Agency, USA, TDCK 61083.

[7] Sevat, P.A.A., A method for calculating the shielding effect of solid-shell enclosures against EMP; EMC Symposium Record, Montreux, May 1975.

[8] Sevat, P.A.A., Overzicht van de activiteiten van het Physisch Laboratorium TNO m.b.t. de EMP; Voordracht gehouden op 20 jan. 1977 voor Afd. Krijgskundige Techniek van het KIvI, TDCK-YCV 42301; gedeeltelijk gepubliceerd in De Ingenieur; jrg. 90, nr. 12, 23 maart 1978.

[9] Sevat, P.A.A., De elektromagnetische puls, Onderzoek onder hoogspanning; Natuur en Techniek, jaargang 50, nr. 8, aug. 1982, TDCK 77279.

[10] Sevat, P.A.A., Methods for calculating the shielding effect of solid-shell enclosures against EMP; Phys. Lab. TNO, IR 1981-27, May 1981, TDCK 77281.

[11] Sevat, P.A.A., Design of a shield based on time domain analysis; Phys. Lab. TNO, Dec. 1982, TDCK 77399.

TDCK = Technisch Documentatie Centrum voor de Krijgsmacht, Van der Burchlaan 31, Geb. 140, Den Haag.

Voordracht gehouden tijdens een gemeenschappelijke vergadering van het NERG (nr. 310), de Sectie Telecommunicatietechniek KIvI, en de IEEE Benelux Sectie, op 4 november 1982 in de Afdeling Elektrotechniek van THD.

MAATSCHAPPIJ EN TECHNIEK

Het Ros Beiaard en het Paard van Troje

Na meer dan 10 jaren touwtrekken tussen het ministerie van Onderwijs en Wetenschappen en de instellingen van wetenschappelijk onderwijs werd enige jaren geleden de Wet twee-fasenstructuur aangenomen. Deze wet houdt in dat alle onderwijsprogramma's bij het W.O. vier jaren mogen duren en dat studenten slechts maximaal zes jaren mogen studeren. Na deze vierjarige opleiding zou dan voor een deel van de studenten de mogelijkheid worden geopend nog een éénjarige vervolgopleiding te volgen. Van meet af aan hebben de instellingen van W.O. moeite gehad met het op een zinvolle wijze gestalte geven aan deze tweede fase van de opleiding. Inmiddels heeft het ministerie van O. en W. gemeend in te moeten spelen op dit feit. De onderhavige voorstellen zijn door het ministerie verpakt in een concept beleidsnota Beiaard. In deze nota worden een viertal acties van het ministerie van O. en W. met betrekking tot het wetenschappelijk onderwijs en hun onderlinge samenhang beschreven. Deze acties zijn:

- de invoering van de Wet twee-fasenstructuur,
- de invoering van voorwaardelijke financiering van onderzoek,
- de herstructurering van de opbouw van het wetenschappelijk personeel, en
- taakverdeling en concentratie.

De nota is eens een keer niet genoemd naar de voorzitter van de commissie of werkgroep die dit stuk heeft opgesteld, maar naar een figuur uit de middeleeuwse literatuur, n.l. naar het Ros Beiaard.
Het Ros Beiaard - ik hou hier maar de spelling aan die ook in de nota wordt gebruikt - was het paard dat de beroemde vier Heemskinderen als rijdier diende. Dit rijdier heeft de vier Heemskinderen practisch onoverwinnelijk gemaakt. De geweldige kwaliteiten van dit rijdier blijken o.a. uit het feit dat de vier Heemskinderen eens een veldslag tegen 3000 tegenstanders wisten te winnen. Ik weet niet of de schrijvers van de nota de hele geschiedenis van de vier Heemskinderen nog eens hebben gelezen. Het loopt namelijk slecht af met het Ros Beiaard. Op een gegeven moment zijn de vier Heemskinderen toch nog de gevangenen van Koning Karel geworden en hij heeft ze bevolen het trouwe dier te verdrinken, hetgeen na veel moeite inderdaad lukte. Ik hoop voor de departementale notaschrijvers dat de symboliek die hierin verscholen ligt niet eveneens op hun nota van toepassing zal blijken te zijn.

Het ligt niet in de bedoeling in het kader van dit artikeltje deze nota in extenso te bespreken. Slechts één aspect, dat als een rode draad door de nota heen loopt dient hier aan de orde te worden gesteld. Teneinde n.l. de moeilijkheden met de vormgeving van de twee-fase opleiding aan te pakken en te voorkomen dat er een impasse ontstaat in de doelmatige uitvoering van de Wet twee-fasenstructuur stelt men nu voor de éénjarige vervolgopleiding te laten vervallen en in de plaats daarvan voor een beperkt aantal studenten een meerjarige vervolgopleiding te creëren, die dan in het algemeen zou moeten leiden tot een promotie. Ook een aanstelling van kortere duur gaat tot de mogelijkheden behoren. De nota heeft natuurlijk betrekking op het gehele wetenschappelijk onderwijs en is niet speciaal bedoeld voor het technisch hoger onderwijs. Met betrekking tot dit onderdeel van het wetenschappelijk onderwijs wordt in de nota nog opgemerkt dat de activiteiten van ingenieurs in het algemeen gekenmerkt worden door het begrip ontwerpen en bij het w.o. veelal niet leiden tot het schrijven van een proefschrift.

Het verschijnsel promotie heeft in het recente verleden enige aandacht gekregen van de Academische Raad, hetgeen moge blijken uit het verschijnen van een rapport over dit onderwerp [1]. De titel van dit geschrift is: "Het schrijven van een proefschrift", met als ondertitel - hoe gaat dat in de praktijk? - wat leert men er van? - wat levert het op?. De auteur van dit geschrift heeft getracht op deze drie vragen een antwoord te vinden. Het onderzoek had betrekking op de periode 1966 t/m 1980 en bestreek vier faculteiten, te weten, geneeskunde, letteren, sociale wetenschappen en wis- en natuurkunde. Dit onderzoek werd uitgevoerd door aan een aantal gepromoveerde academici (215) vragenlijsten toe te zenden en de antwoorden hierop te bewerken. Hoewel de resultaten van dit onderzoek interessante lectuur vormen voor diegenen, die belangstelling hebben voor een dergelijk onderzoek, zal hier van een uitgebreide bespreking worden afgezien omdat in de onderhavige studie geen aandacht is gewijd aan promoties in de technische wetenschappen. Anders ligt dit met een studie van J. Friedel, president van de European Physical Society, naar het verschijnsel promotie in een aantal OESO-landen. De resultaten van deze studie zijn recentelijk gepubliceerd [2]. Waarom de heer Friedel vindt dat dit onderwerp de nodige aandacht verdient kan men vinden in de inleiding van zijn artikel:
"*The scientific recession observed in many countries in the '70s has often resulted in a general decrease in the numbers of Ph.D.s trained every year, both because there seemed to be fewer job openings for Ph.D.s in industry, government agencies and universities, and because research careers looked less attractive. Often this has gone with a lowering of the tone of university research. In some countries however, a renewed demand for scientific Ph.D.s, especially in applied mathematics, physics, microelectronics and the materials sciences, has*

developed in the last few years, and is often difficult to satisfy owing to a lack of Ph.D. students. This demand is primarily for research and development activities, at least as a starting point. But a certain number of jobs exist also in other areas, ranging from industry and commerce, to administration and secondary school teaching. Both the training and employment of scientific Ph.D.s are therefore matters of the utmost importance to the laboratories that train them, their prospective users and through them, the whole social structure which can be permeated by the spirit of research."
Het door de heer Friedel verzamelde statistische materiaal is in Tabel 1 weergegeven.

Tabel 1 – **Ph.D.s Formed in Natural Sciences and Engineering**

Country	France *	FRG	UK	USA	Japan **
Year	1979	1978	1977	1978	1980
Natural Sciences (physics)	≃ 1700 (≃ 350)	2463 (542)	2251 (412)	7385 (1066)	681 (212)
Engineering	≃ 800	1042	939	2493	656
Total	2509	3505	3290	9878	1337

NB * Splitting between physics and engineering is less marked than elsewhere.
** Exit fluxes of 3 year doctorate courses, not Ph.D.s, which on average take 4-5 years in science.

Opvallend in deze tabel is dat het aantal promoties in de technische wetenschappen circa twee maal groter is dan het aantal promoties in de natuurkunde. Dit verschijnsel doet zich blijkbaar in alle landen, die door Friedel onderzocht zijn, voor.
Omdat in het bovenbesproken onderzoek Nederland ontbreekt heb ik een mini-onderzoek verricht. Dit onderzoekje had betrekking op 469 promoties aan de THE in de periode 1959 t/m 1981. De resultaten zijn in Tabel 2 samengevat.

Tabel 2.

Promoties aan de THE (1959 t/m 1982). Verdeling over de afdelingen	
Wijsbegeerte en Maatschappij Wetenschappen	3,2 %
Bedrijfskunde	2,6 %
Wiskunde	9,6 %
Natuurkunde	25,6 %
Werktuigbouwkunde	7,9 %
Elektrotechniek	14,3 %
Scheikundige Technologie	34,9 %
Bouwkunde	4,9 %

Uit de tabel volgt dat het aantal promoties met een typisch technisch karakter (elektrotechniek en werktuigbouwkunde) ongeveer gelijk is aan het aantal promoties in de natuurkunde. Rekent men scheikundige technologie tot "engineering" dan vindt men weer de verhouding 1:2, zoals die ook door Friedel gevonden is.

Uit nieuwsgierigheid heb ik ook nog het totaal aantal promoties vergeleken met het totaal aantal afgestudeerden van de THE en wel voor de periode 1963 t/m 1981. In die periode werden 456 doctorsbullen uitgereikt tegenover 6307 ir-diploma's. Dit komt neer op circa 7 %.

Volgens een artikel in Le Monde, onder de titel "Stratégies pour la recherche" [3] studeren per jaar in Frankrijk 12.000 ingenieurs af, terwijl er per jaar 700 ingenieurs een promotieonderzoek afronden. Dit is circa 6 %. Volgens hetzelfde bericht vindt M. Jean-Pierre Chevènement, ministre de la recherche et de l'industrie, dat dit aantal van 700 per jaar opgevoerd moet worden tot 1500 per jaar. Zo een doelstelling is echter sneller geformuleerd dan gerealiseerd. Waar precies de te verwachten moeilijkheden liggen kan m.i. het best geïllustreerd worden met het volgende citaat uit het reeds genoemde bericht:
"Alors qu'un ingénieur diplômé d'ENSI (Ecole nationale supérieure d'ingénieurs) est embauché avec un salaire de départ supérieur à 10000 francs, les bourses de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (D.G.R.S.T.) sont toujours en dessous de la barre des 4000 francs. L'ingénieur qui a fait un doctorat ne sera pas plus payé qu'un jeune diplômé et pourtant il aura étudié trois ans de plus (dans le meilleur cas, son salaire sera rattrapé). Aux Etats-Unis, à ce niveau d'études, un ingénieur-chercheur est embauché avec un salaire de départ supérieur de 12 % à celui de ses collègues."

Teneinde dit financiële probleem tot een oplossing te brengen heeft de heer Chevènement een samenwerkingsprogramma tussen de industrie en de universiteiten opgezet. Dit plan komt hier op neer dat bedrijven per jaar 70.000 francs ontvangen voor een jong ingenieur die in dienst genomen wordt. Dit bedrag is ongeveer 50% van de jaarlijkse loonkosten, die een bedrijf voor een jong ingenieur moet betalen. De zo aangestelde ingenieurs werken gedurende drie jaar onder leiding van een hoogleraar op de universiteit aan een project dat van direct belang is voor het betreffende bedrijf. Er wordt verwacht dat de op deze basis aangestelde ingenieurs na drie jaar het opgedragen onderzoek afsluiten met het schrijven van een proefschrift. Inmiddels zijn in 1982 op deze basis 150 ingenieurs aangesteld.

Voor de volledigheid moge hier nog vermeld worden dat in de USA een soortgelijke samenwerkingsovereenkomst tussen de afdeling der elektrotechniek van de universiteit van Maryland en Fairchild Industries bestaat. Dit bedrijf is actief op het gebied van de ruimtevaart en de telecommunicatie. In dit geval worden de salarissen van de promovendi betaald door Fairchild Industries, terwijl ze niet verplicht zijn na afloop van de overeenkomst bij Fairchild Industries te gaan werken [4].

De bovengeschetste acties met als doelstelling het kunnen

beschikken over hooggekwalificeerde onderzoekers sluit enigszins aan bij datgene wat in de nota Beiaard wordt voorgesteld. In deze nota wordt, zoals reeds gemeld, voorgesteld een vervolgopleiding op de eerste fase opleiding op te zetten teneinde op deze wijze een voldoende aantal goede onderzoekers in de toekomst te kunnen opleiden. Omdat een dergelijke opleiding natuurlijk gefinancierd moet worden hebben de departementale plannenmakers ook hierover hun gedachten laten gaan. Het Haagse voorstel komt hierop neer dat men jonge academici het eerste jaar een maandsalaris van ƒ 1500,= wil betalen; in het vierde jaar ongeveer ƒ 3000,= per maand. Blijkbaar is men er vanuit gegaan dat het maandsalaris in het tweede jaar ƒ 2000,= zal bedragen en in het derde jaar ƒ 2500,=. Over vier jaar gerekend komt men dan op een totale som van ƒ 108.000,=. Telt men hierbij 50% sociale lasten dan vindt men ƒ 160.000,= of wel gemiddeld ƒ 40.000,= per jaar.
Als argument om in het eerste jaar slechts ƒ 1500,= per maand te betalen voert men aan dat de pas afgestudeerde nog het een en ander moet leren en pas geleidelijk aan geheel inzetbaar wordt. Deze argumenten kan men natuurlijk ook hanteren voor jonge ingenieurs die direct na het behalen van het ingenieursdiploma door de industrie worden aangetrokken. Het is nu interessant eens na te gaan wat de totale loonkosten, gerekend over vier jaar, zijn voor een industrie bij het aanstellen van een ingenieur. In het algemeen is het niet simpel hierover enigszins betrouwbare informatie te krijgen. Het lijkt echter niet onredelijk dan maar eens naar het aanstellingsbeleid van de PTT te kijken. Men heeft mij uitgelegd dat net afgestudeerde ingenieurs bij de PTT een aanvangssalaris krijgen dat overeenkomt met het begin van schaal 112 (rijksoverheid). Dit bedrag is momenteel ƒ 3298,= en is na vier jaar opgelopen tot ƒ 3765,= per maand. Inclusief 50% sociale lasten betekent dit een bedrag van ƒ 255.000,= gerekend over vier jaar.

Het is zonneklaar dat er in de toekomst geen enkele ingenieur voor ƒ 1500,= per maand zal gaan werken bij het technisch hoger onderwijs. Het voorstel voor een vervolgopleiding, zoals neergelegd in de conceptnota Beiaard, moet voor wat betreft de technische wetenschappen als volstrekt irreëel worden gekenmerkt. Of de voorstellen binnen andere sectoren van het wetenschappelijk onderwijs uitvoerbaar zijn kan de schrijver van dit artikel niet overzien.

Hoewel de gedachte om een vierjarige vervolgopleiding te creëren voor een beperkt aantal studenten beslist sympatiek aandoet dient, voor wat betreft de technische wetenschappen, iets gedaan te worden aan de financiële randvoorwaarden die bij dit voorstel zijn aangebracht. Men zou b.v. kunnen besluiten voor de promovendi binnen de technische wetenschappen de salariëring op een niveau te brengen dat vergelijkbaar is met die van de industrie. Uiteraard zal dat als konsequentie hebben dat het aantal beschikbare plaatsen zal afnemen. Dit voorstel heeft natuurlijk als bezwaar dat de uniformiteit uit het systeem gehaald wordt; met alle gevolgen van dien.

Het lijkt mij dat er wellicht nog andere mogelijkheden zijn om met beperkte middelen een vervolgopleiding te maken. Men zou bijvoorbeeld researchprojecten kunnen formuleren, waarvan de resultaten pas op termijn voor een industrie van belang zijn. Deze projecten zouden dan op basis van een contract tussen de betreffende industrie en een hogeschool aangepakt kunnen worden. Deze researchprojecten zouden bij voorkeur binnen een hogeschool uitgevoerd moeten worden onder leiding van een hoogleraar of een andere deskundige. Van meet af aan zou ook vast moeten staan dat aan het eind van de (vierjarige) contractperiode het onderzoek met een promotie afgesloten zal worden. De financiering van de loonkosten zou dan gezamenlijk moeten geschieden door industrie en hogeschool, waarbij de hogeschool het leeuwenaandeel van de ƒ 255.000,=, te weten ƒ 160.000,=, voor zijn rekening moet nemen. De industrie zou dus slechts voor ƒ 95.000,= in de kosten dienen bij te dragen.

De voordelen van een dergelijke constructie zijn
- promovendi werken aan problemen die op termijn van belang zijn voor de industrie
- de industrie kan na vier jaar een medewerker aanstellen die gewerkt heeft op een gebied waarin de industrie geïnteresseerd is
- de financiële lasten voor een bedrijf zijn slechts een fractie van wat opgebracht moet worden indien het bedrijf zelf zijn medewerkers wenst op te leiden
- voor de rijksoverheid ontstaan er geen extra kosten.

Als nadeel van deze constructie zal door sommigen beslist genoemd worden dat op deze wijze de research aan de hogescholen te veel door de industrie gecontroleerd wordt en dat op deze wijze het paard van Troje binnengehaald wordt. Ik deel deze zienswijze niet. Wellicht zijn er bij nadere studie nog wel enige haken en ogen aan dit voorstel te ontdekken. Met enige vindingrijkheid zijn die hopelijk de wereld uit te helpen.

M. Jeuken.

Literatuur

[1] P. Buis, "Het schrijven van een proefschrift", Themaserie nr. 1, Ac. Raad, Uitg. Ac. Raad Den Haag.
[2] J. Friedel, "Training and Jobs for Ph.D.s in Physics and Eng." Europhysics News, Vol.12, no. 10, Oct. '82.
[3] Le Monde, 24 mars 1983.
[4] H. Boroson and A. Ephremides, "The Fairchild scholar and doctoral fellow program at the university of Maryland, IEEE Communications Magazine, vol.20, no.5, September 1982, pp. 40-41.

EUREL

WHAT IS EUREL?

Eurel is the Convention of National Societies of Electrical Engineers of Western Europe, and is an association of 18 national societies in 13 countries with a total membership of about 165.000 individuals and companies.

Aims and objectives

Eurel facilitates communication and the exchange of information between members and fosters a wider dissemination of scientific, technical and related knowledge relevant to electrical engineering.

Benefits

Individual members of the association enjoy to all national and international meetings, seminars and colloquia etc. the same rights as the members of the organisations sponsoring such events. The individual members of an association may also use the facilities of the host association such as clubs, libraries etc. as guest for a limited period of time.

Conference assistance

Eurel, when requsted, provides assistance for international conferences organised by members of the association by asking the other members to publish information about such conferences in their magazines or bulletins and to distribute programmes and call for papers among their members.

Eurel conference - Eurocon

In association with the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Eurel organises international conferences on topics in the field of electrical engineering. For example, EUROCON '80 was held on the theme "From Electronics to Micro-electronics", the conference subject of EUROCON '82 was "Reliability in Electrical and Electronic Components and Systems", and the theme for EUROCON '84 will be "Computers in Communication and Control".

Pronouncements

Eurel prepares resolutions on actual problems of general interest in the field of electrical engineering. For example, in 1981 a resolution was adopted on the production and use of energy. The resolution was directed to the Commission of the European Communities in Brussels and to the respective authorities of the national associations.

Secretariat

The address of the Eurel Secretariat in 1982 is:

Stresemannallee 15
D-6000 Frankfurt am Main 70
Telephone: (611) 6308 200
Telex: 412871 vdetz

Memebership

The members of the associations are:

- A - Österreichischer Verband für Elektrotechnik (ÖVE), Wien
- B - Société Royale Belge des Electriciens (SRBE), Bruxelles
- B - Association des Ingénieurs Electriciens sortis de l'Institut Electrotechnique Montefiore (Université de Liège) (AIM), Liège
- CH - Scheizerischer Elektrotechnischer Verein (SEV) Association Suisse des Electriciens (ASE), Zurich
- D - Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) e.V., Frankfurt am Main
- DK - Ingniør-Sammenslutningen I-VD (IS), København
- DK - Elektroingeniørgruppen (in Dansk Ingeniørforening) (DIF's E-Gr), København
- E - Asociación Electrotécnica Espanola (AEE), Madrid
- F - Société des Electriciens, des Electroniciens et des Radioélectriciens (SEE), Paris
- GB - Institution of Electrical Engineers (IEE), London
- GB - Institution of Electronic and Radio Engineers (IERE), London
- I - Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana (AEI), Milano
- N - Norsk Elektroteknisk Forening (NEF), Oslo
- NL - Koninklijk Instituut van Ingenieurs - Afd. Elektrotechniek (KIVI), Den Haag
- NL - Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap (NERG) Leidschendam
- S - Svenska Elektroingenjörers Riksförening (SER), Stockholm
- SF - Sähköinsinööriliitto R.Y. Elektroingenjörsförbundet R.F. (SIL), Helsinki
- SF - Elektroniikkainsinöörien Seura R.Y. (EIS), Espoo

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

Ir. B.J.A. Koenderink, Sluiskade N.Z. 158, Almelo.

Nieuwe leden

J. van Bruggen, Witbreuksweg 401-308, Enschede.
H.L.H.M. Castermans, Gustaaf Coenegrachtstraat 36, Maastricht.
Dipl.-Ing. J.J. Dharmadi, Croesinckplein 116, Zoetermeer.
Ir. C.A.M. Geus, Stadhoudersring 64, Zoetermeer.
Ir. L.J.M. Joosten, Visseringhlaan 5, Emmeloord.
Ir. M.G. van Leerdam, Floris Versterlaan 28, Oegstgeest.
Ir. P.J.H.M. Manders, Tureluurhof 34, Purmerend.
Ir. B.J.P. van der Peet, Hamseweg 70 A, Hoogland.
G. van der Schouw, Antoon Markusstraat 29, Renkum.
Ir. R.A.C.M. van Spaendonk, Klatteweg 1, 's-Gravenhage.
Ir. F.P. Sijtsma, Rietzangerstraat 10, Delft.
H. Vrijmoed, Kluutring 17, Delft.

Nieuwe adressen van leden

C.J.Benjamin, 'Kievitsval', Laan van de Eekharst 78, Emmen.
Ir. M.J. Ceuleers, Atjehstraat 12, Winterswijk.
Prof. ir. P.C. van der Geest, Aert van Neslaan 548, Oegstgeest.
Ir. P. Groenveld, Ranger 5, Heeze.
Prof. dr.ir. A.T. de Hoop, J.J. Slauerhofflaan 163, Delft.
J. Lennings, Irenelaan 10, Ermelo.
Ir. A.C. Reppel, Laan van Spaland 7, Schiedam.
C.A. Smit, Irisplein 36, 's-Gravenhage.
Ir. J.A.C.M. van Tiggelen, van Tuldenstraat 34, Oirschot.

Overleden

C.G. Wouters, Suzannaland 456, 's-Gravenhage.



International Conference on Communications



CALL FOR PAPERS

The International Conference on Communications ICC-84 will be held in the RAI Conference Centre at

AMSTERDAM-THE NETHERLANDS
MAY 14-17, 1984

You are invited to submit an original paper highlighting the conference theme:

"Science-Systems-Service"

Your paper should address a suggested area of interest Please note the schedule and instructions.

SCHEDULE

September 1, 1983:
– Complete manuscript must be received;

December 20, 1983:
– Notification of acceptance and author kits will be mailed

February 1, 1984:
– Camera-ready copies must be received

ICC-84 is CO-SPONSORED BY:
IEEE Communications Society IEEE Benelux Section

WITH PARTICIPATION OF: EUREL, KIvI, NERG and IEE

INSTRUCTIONS

Send five typed double-spaced copies of the manuscript (including a 100 word abstract) to:

C.A. May Technical Program Chairman
British Telecom Research Laboratories
Martlesham Heath Ipswich IP5 7RE England
Phone: +44 473 642233 Telex: 98376 (THQRD G)

or to:

EUROPE, AFRICA AND MIDDLE EAST
Mr. M. Urien CNET
Route de Tregastel BP 40,
22301 Lannion CEDEX France
Phone: +33 96 382915
Telex: 950455 CNET AGL

CENTRAL AND SOUTH AMERICA
Dr. J. Valerdi CICESE
P.O. Box 222
San Ysidro, CA 92073 USA
Phone: (714)398-3803
Telex: 056539

NORTH AMERICA AND CANADA
Dr. F.T. Andrews
Bell Laboratories Room 2C635
Crawfords Corner Road
Holmdel, NJ 07733 USA
Phone: (201) 949-3143

AZIA AND OCEANIA
Dr. N. Kuroyanagi
NTT, Musashino Electrical Communication Laboratory
Musashino-Shi Tokyo, 180, Japan
Phone: (0422) 59-2539
Telex: (0) 2822620 NTTECL J

Manuscrips are limited to 3000 words and must be in English. Each manuscript must contain the author's name and complete address on the first page and an indication of the area of interest (see list).

AREAS OF INTEREST

1. Communication Switching
2. Communication Terminals
3. Communication Networks
4. Communications Software
5. Communication Systems Disciplines
6. Communication Theory
7. Radio Communications
8. Data Communications Systems
9. Computer Communications
10. Satellite and Space Communications
11. Transmission Systems
12. Other Communications
13. Signal Processing
14. Standards
15. Social Implications
16. Educational Services
17. Scientific Basis for future Communications
18. Field Trials and their Outcomes
19. Reliability and Availability
20. Other Related Topics



KLM Royal Dutch Airlines have been appointed Official Carrier for ICC-84

KLM-staff and appointed travel agents will be happy to assist you preparing your trip to the Netherlands.

ENQUIRY FORM

If you want to have more information about the conference, please complete this form and mail it to the address below. This will guarantee that you will receive a copy of the advance program with registration form as soon as they will be available.

☐ I am planning to attend the conference

I am interested in information about:
☐ the exhibition
☐ hotel accomodation in Amsterdam
☐ transportation to the conference
☐ other topics (please specify)

Mail to: Dr. T.A.C.M. Claasen Secretary ICC-84
Philips Research Laboratories WY-2
5600 MD Eindhoven The Netherlands

Name:

Address:

Country:

Conferentie aankondigingen

Solid-State Transducers 83, 31 mei - 3 juni 1983, Delft. Contact adres: C.Beekhuizen THD, P.O. Box 5031, 2600GA Delft.

Conumel 83, 9-11 mei 1983, Toulouse, Contact adres: J. Hector - L.E.E.I.; 2, rue Charles Comuchel; 31071 Toulouse; France

Fifth conference on Software engineering for telecommunication switching systems, 4-8 juli 1983, Lund, Southern Sweden; 1)

Third International Conference on Satellite Systems for mobile communications and navigation; 7-9 june 1983, Savoy Place London WC2.[1)]

Second European Conference on Integrated Optics, 17-18 October 1983; Palazzo dei Congressi, Firenze, Italy; Contact adres: Secretariat E.C.I.O. '83; c/o IROE-CNR; Via Ponciatichi 64; 1-50127 Firenze, Italy.

Architektur und Betrieb von Rechensystemen, 26-28 maart 1984, Universität Karlsruhe; Call for papers 1-9-1983, Contact adres: Prof.dr. H.Wellstein, Institut fur Informatik III, Universität Karlsruhe, Zirkel 2, D-7500 Karlsruhe 1. Tel. 0721-608-3834.

EDA 84, Electronic design automation; 26-30 maart 1984, Warwick University U.K.[1)] Call for papers 6 june 1983.

Intermag Conference, International Magnetics Conference, 10-13 april 1984, Hamburg Germany Congres Centrum. Call for papers 1-12-1983. Contact adres: G.Winkler, Philips Forschungslaboratorium P.O. Box 540840, D-2000 Hamburg 54 Germany.

Eurocon 84; 26-28 aeptember 1984, Brighton U.K.;[1)]
Energy options; 3-6 april 84; Savoy Place London WC2[1)]

Power electronics and variable-speed drives; 1-4 May 1984 Savoy Place London WC2 [1)]

1) Contact adres: Conferenc Services IEE
Savoy Place
London WC2R OBL
U.K.
Telephone 01-2401871 (Ext 222)

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 48 - nr. 2 - 1983

druk: de Witte Eindhoven